

Entwicklungspotenziale für ein passiv klimatisiertes Gebäude mit Badgir und Luftkollektor in Isfahan (Iran)

Vom Fachbereich Architektur
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

von

Kamyar Nasrollahi

Dekan:	Prof. Johannes Modersohn
1. Berichterstatter:	Jun.-Prof. Dr.-Ing. Angèle Tersluisen
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Annette Rudolph-Cleff
Tag der mündlichen Prüfung: 10.03.2016	

Kaiserslautern 2016

(D 386)

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Variablen und Abkürzungen	v
1 Einleitung	1
1.1 Veranlassung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	3
2 Grundlagen	5
2.1 Thermische Behaglichkeit	5
2.2 Funktionsprinzip von Luftkollektoren	7
2.3 Funktionsprinzip des Badgirs	10
2.3.1 Badgir mit Überdruck	11
2.3.2 Badgir mit Unterdruck	15
2.3.3 Badgir mit Überdruck und Unterdruck	17
2.3.4 Moderner Badgir	17
2.4 Energiebedarf einer Zone	18
2.4.1 Heizwärmebedarf	19
2.4.2 Kühlbedarf	19
3 Bilanzierung des Heizwärmebedarfs einer Gebäudezone nach DIN V 18599-2	20
3.1 Wärmesenken Q_{sink}	22
3.1.1 Transmissionswärmesenken Q_T	22
3.1.1.1 Transmission durch Außenbauteile	23
3.1.1.2 Transmission zu unbeheizten Gebäudezonen oder Vorbauten	23
3.1.1.3 Transmission zu angrenzenden beheizten Gebäudezonen	24
3.1.1.4 Transmission zum Erdreich	24
3.1.2 Lüftungswärmesenken Q_v	25
3.1.2.1 Lüftungswärmesenken durch Infiltration von Außenluft	25
3.1.2.2 Lüftungswärmesenken durch Fensterlüftung	26
3.1.2.3 Kälteeinträge durch mechanische Lüftungsanlagen	27
3.1.2.4 Lüftungswärmesenken durch Luftaustausch von/zu anderen Zonen	27
3.1.3 Interne Wärmesenken Q_I	27
3.1.3.1 Kälteeintrag durch Kühlsystem	28
3.1.3.2 Wärmesenken durch Geräte und Maschinen	28
3.1.3.3 Wärmesenken durch Stofftransport	28
3.1.4 Wärmesenken durch Abstrahlung	28
3.2 Bilanzierung der Wärmequellen Q_{source}	28
3.2.1 Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung Q_s	29

3.2.1.1	Wärmequellen durch solare Einstrahlung durch transparente Flächen	29
3.2.1.2	Wärmequellen durch solare Einstrahlung auf opake Fläche	30
3.2.2	Transmissionswärmequellen QT	31
3.2.3	Lüftungswärmequellen QV	31
3.2.3.1	Wärmeeinträge durch mechanische Lüftungsanlagen	31
3.2.4	Interne Wärmequellen QI	32
3.2.4.1	Wärmequelle durch Personen	32
3.2.4.2	Wärmequellen durch künstliche Beleuchtung	33
3.2.4.1	Wärmequellen durch Geräte und Maschinen	33
3.2.4.2	Wärmequellen durch Stofftransport	33
3.2.4.3	Wärmequellen/-senken durch Heiz-, Trinkwasser- und Lüftungssystem	34
3.3	Ausnutzungsgrad für Wärmequellen η	34
4	Energetische Bilanzierung des Luftkollektors harmonisiert mit der Bilanzierung nach DIN V 18599-2	37
4.1	Wärmeeinträge durch Luftkollektor durch Konduktion	37
4.1.1	Konduktionsluftkollektor mit transparenter Außenschicht	38
4.1.2	Konduktionsluftkollektor mit opaker Außenschicht	40
4.2	Wärmeeinträge durch Konvektionsluftkollektor	41
4.2.1	Konvektionsluftkollektor mit Luftaustausch mit der Raumluft	41
4.2.1.1	Konvektionsluftkollektor mit transparenter Außenschicht	41
4.2.1.2	Konvektionsluftkollektor mit opaker Außenschicht	44
4.2.2	Konvektionsluftkollektor mit Zuluft aus der Außenluft	45
4.2.2.1	Außenluft-Konvektionsluftkollektor mit transparenter Außenschicht	46
4.2.2.2	Außenluft-Konvektionsluftkollektor mit opaker Außenschicht	47
4.3	Luftkollektor gekoppelt an TGA-Anlage	49
5	Berechnung des Kühlenergiebedarfs einer Zone nach DIN V 18599-2	51
5.1	Wärmesenken Q _{sink}	51
5.1.1	Transmissionswärmesenken QT	52
5.1.1.1	Transmission durch Außenbauteile	52
5.1.1.1	Transmission zum Erdreich	53
5.1.2	Lüftungswärmesenken Q _v	53
5.1.2.1	Lüftungswärmesenken durch Infiltration von Außenluft	54
5.1.2.1	Lüftungswärmesenken durch Fensterlüftung	54
5.2	Bilanzierung der Wärmequellen Q _{source}	55
5.2.1	Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung	55

5.2.1.1	Wärmequellen durch solare Einstrahlung durch transparente Flächen	55
5.2.1.1	Wärmequellen durch solare Einstrahlung auf opake Fläche	56
5.2.2	Transmissionswärmequellen QT	57
5.2.2.1	Transmission durch Außenbauteile	57
5.2.2.1	Transmission von ungekühlten Gebäudezonen oder Vorbauten	58
5.2.2.1	Transmission von angrenzenden gekühlte Gebäudezonen	58
5.2.3	Lüftungswärmequellen QV	58
5.2.3.1	Lüftungswärmequellen durch Infiltration von Außenluft	59
5.2.3.2	Lüftungswärmequellen durch Fensterlüftung	60
5.2.3.3	Wärmeeinträge durch mechanische Lüftungsanlagen	60
5.2.3.4	Lüftungswärmquellen durch Luftaustausch von/zu anderen Zonen	60
5.2.4	Interne Wärmequellen $Q_{I,source}$	61
5.2.4.1	Wärmequelle durch Personen	61
5.2.4.2	Wärmequellen durch künstliche Beleuchtung	62
5.2.4.1	Wärmequellen durch Geräte und Maschinen	62
5.2.4.2	Wärmequellen durch Stofftransport	62
5.2.4.3	Wärmequellen/-senken durch Heiz-, Trinkwasser- und Lüftungssystem	62
5.3	Ausnutzungsgrad für Wärmequellen η	63
6	Energetische Bilanzierung vom Badgire angepasst zur DIN V 18599-2 und DIN V 18599-6	64
6.1	Badgire als Lüftungselement	65
6.2	Badgire mit adiabater Kühlung	67
7	Ermittlung der Heizwärme- und Kühlenergiebedarfs eines Einfamilienhauses mit Kollektor und Badgire	72
7.1	Bilanzierung des Heizwärmebedarfs des Gebäudemodells	76
7.1.1	Bilanzierung der Wärmesenken Q_{sink}	76
7.1.1.1	Transmissionswärmesenken QT	76
7.1.1.2	Lüftungswärmesenken Qv	77
7.1.2	Bilanzierung der Wärmequellen Q_{source}	78
7.1.2.1	Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung Q_s	78
7.1.2.2	Interne Wärmequellen Q_I	79
7.1.3	Ausnutzungsgrad für Wärmequellen η	79
7.1.4	Deckungsgrad vom Luftkollektor	80
7.2	Bilanzierung des Kühlenergiebedarfs vom Gebäudemodell	81
7.2.1	Wärmesenken Q_{sink}	81
7.2.2	Bilanzierung der Wärmequellen Q_{source}	82

7.2.2.1	Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung Q_s	82
7.2.2.1	Interne Wärmequellen Q_I	83
7.2.3	Ausnutzungsgrad für Wärmequellen η	83
7.2.4	Deckungsgrad des Badgirs	84
Ausblick		85
8	Literaturverzeichnis	86

Formelzeichen, Variablen und Abkürzungen

Große lateinische Buchstaben

<i>A</i>	Fläche [m ²]
<i>C</i>	Wirksame Wärmekapazität der Gebäudezone [kJ/K], [(W.h)/K]
<i>F</i>	Faktor
<i>H</i>	Wärmetransferkoeffizient allgemein/ Wärmeübertragungskoeffizient [W/m ² .K]
<i>I</i>	solare Einstrahlung [W/m ²]
<i>Q</i>	Wärme, Wärmemenge nach DIN EN ISO 7345 (DIN EN ISO 7345 1996) [Wh], [kWh], [Wh/a], [kWh/a]
<i>R</i>	Wärmedurchlasswiderstand/ Wärmeübergangswiderstand [W/(m ² .K)]
<i>U</i>	Wärmedurchgangskoeffizient [W/m ² .K]
<i>V</i>	Nettovolumen (belüftetes Volumen) [m ³]

Kleine lateinische Buchstaben

<i>a</i>	Numerische Parameter
<i>b</i>	Badgir
<i>c</i>	Spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg.K)]
<i>f</i>	Faktor
<i>g</i>	Gesamtenergiedurchlassgerad
<i>g</i>	Erdbeschleunigung [m/s ²]
<i>h</i>	Wärmeübergangskoeffizient/ Abstrahlungskoeffizient [W/(m ² .K)]
<i>h</i>	Höhe [m]
<i>n</i>	Luftwechselrate nach DIN EN ISO 7345 (DIN EN ISO 7345 1996) [h ⁻¹]
<i>q</i>	Sollwert des Luftvolumenstroms [m ³ /S]
<i>s</i>	Solar
<i>t</i>	Zeitspanne/ Zeit [h]

Griechische Buchstaben

α	Strahlungsabsorptionsgrad [-]
θ	Temperatur [°C]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m.K)]
μ	Raumbelastungsgrad
η	Ausnutzungsgrad
γ	Wärmequellen-/Wärmesenken-Verhältnis
ψ	Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient (auch: Wärmebrückenverlustkoeffizient) [W/(m.K)]
ϕ	Wärmestrom [W]
τ	Zeitkonstante einer Gebäudezone [h]
ρ	Rohdichte [kg/m ³]
v	Windgeschwindigkeit, Luftgeschwindigkeit [m/s]
Δ	Differenz

Indizes

<i>a</i>	Jahr, z.B. 1/a= je Jahr
<i>a</i>	Luft
<i>b</i>	Nutzungsbedarf
<i>b</i>	Badgir (Windturm)
<i>B</i>	Bezug
<i>c</i>	Kühlung, Kälte
<i>e</i>	Außen, äußere oder Außerhalb thermischer Hülle
<i>eff</i>	Effektiv
<i>elektr</i>	Elektrisch
<i>F</i>	Rahmen
<i>fac</i>	Durch Maschinen
<i>g</i>	Glas
<i>goods</i>	Durch Waren
<i>h</i>	Heizung für Raumwärme
<i>h</i>	Holzwohle
<i>I</i>	Innen, Intern, im Innen
<i>iu</i>	Von beheizter Gebäudezone in eine unbeheizte Gebäudezone
<i>kol</i>	Luftkollektor
<i>I</i>	Licht
<i>mech</i>	Mechanisch (Lüftungsanlage)
<i>o</i>	Öffnung
<i>opak</i>	Opak
<i>P</i>	Bei konstantem Druck (bei $c_{p,a}$), Winddruck bei (ΔC_p)
<i>P</i>	Person
<i>r</i>	Raum
<i>S</i>	Solar, durch Sonneneinstrahlung
<i>s</i>	Erdreich
<i>sink</i>	Wärmesenken
<i>sol</i>	Sollwert
<i>source</i>	Wärmequelle
<i>T</i>	Transmission
<i>tot</i>	Total, gesamt
<i>tr</i>	transparent
<i>u</i>	Unbeheizter oder ungekühlter Raum bzw. Gebäudezone
<i>ue</i>	Von unbeheizter Gebäudezone zur Außenluft
<i>V</i>	Lüftung
<i>V,mech</i>	Mechanische Lüftung betreffend
<i>W</i>	Wind
<i>WB</i>	Wärmebrücke
<i>wb</i>	Feuchtkügel (wetbulb)
<i>wet</i>	Feuchtkugel
<i>win</i>	Fenster
<i>wirk</i>	Wirksam
<i>z</i>	Angrenzende Gebäudezone
<i>j,k,l</i>	Laufvariablen

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Häuser bieten nicht nur Schutz vor Klima und Wetter, sondern fördern auch das Wohlbefinden der Nutzer bzw. Bewohner. Die thermische Behaglichkeit ist ein bauphysikalisch und psychologisch messbarer Teil des Wohlbefindens. Heizung, Kühlung und Ventilation gehören zu den behaglichkeitsdefinierenden Werkzeugen.

Um thermische Behaglichkeit in Gebäuden zu erreichen, muss Energie aufgewandt werden. Weltweit sind die fossilen Energievorräte beschränkt und der gesamte Energiebedarf steigt jährlich weiter. Zudem gibt es andere Gefahren wie Klimawandel, Erderwärmung, Treibhauseffekt, Umwelt- und die Luftverschmutzung. Der Einsatz fossiler Energie ist Hauptverursacher.

Im Iran wird mehr als 30% vom Gesamtenergiebedarf für die Klimatisierung von Wohngebäuden aufgewendet (Mahdavejad, Abedi 2012).



Abb. 1-1: Einfache Landkarte vom Iran (Rashad 1998: 9)

Der Iran hat verschiedene Klimazonen, die unterschiedliche Anforderungen an die Klimatisierung definieren. Die Mitte des Iran hat kalte Winter und warme und trockene Sommer. Aufgrund der geringen Temperatur während der Heizperiode und der hohen Temperatur während der Kühlperiode weisen die Gebäude in der Mitte des Irans einen großen Heiz- und Kühlbedarf auf. Die folgende Abbildung stellt den Bedarf an Heizung und Kühlung für Isfahan dar.

Pressure: 84038.413 Pa

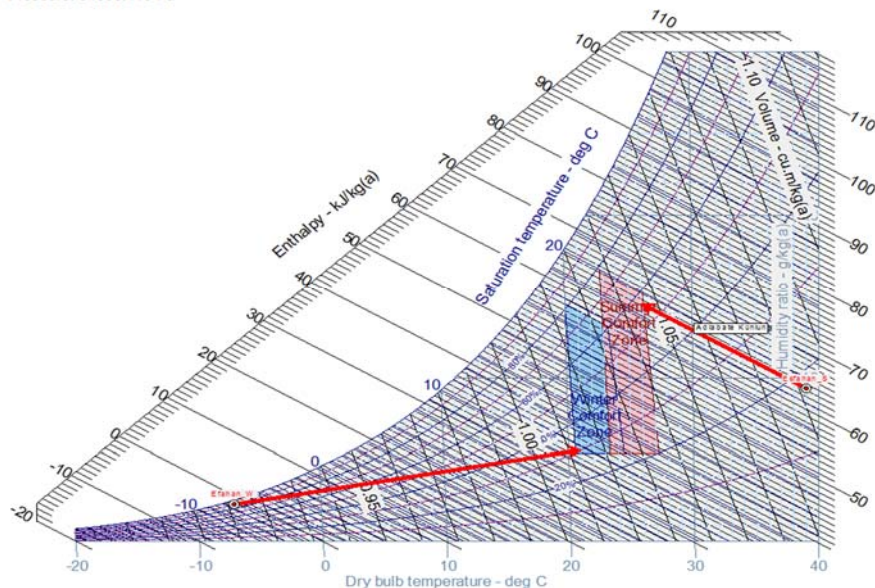


Abb. 1-2: Psychrometric Chart: Temperatur, Feuchtigkeit, Behaglichkeit für Isfahan (Software: Menerga 2009)

Sonnenstrahlungsintensität und Sonnenstrahlungsdauer sind hoch. Die auf die waagerechte Fläche bezogene Globalstrahlung beträgt für Isfahan im Vergleich zu Berlin das 1,75-fache (Isfahan: 1726 kWh/(m²a), Berlin: 985 kWh/(m²a)). Die Sonnenstundenzahl beträgt für Isfahan im Vergleich zu Berlin das 1,74-fache (Isfahan: 3272 h/a, Berlin: 1878 h/a) (Energy Plus 2015).

Trotz der hohen Solarstrahlung und Sonnenstundenzahl sind die Winter in Isfahan kalt, die Temperaturen reichen bis -7°C (Energy Plus 2015). Das Potenzial zur Nutzung solarer Energie zur Bereitstellung des Heizwärmebedarfs in Gebäuden ist sehr hoch.

Im Sommer ist die Feuchtigkeit in Isfahan gering. Gleichzeitig sind die Sommer heiß, die Temperaturen reichen bis 39°C (Energy Plus 2015). Das bedeutet, dass es große Potenziale im Bereich der adiabaten Kühlung gibt.

Im Rahmen dieser Arbeit soll das Potenzial „Solarer Wärmegewinne“ während der Heizperiode und das Potenzial „Adiabate Kühlung“ während der Kühlperiode durch passive Strategien untersucht werden.

In einem ersten Schritt wird daher als ein Element zur Erhöhung solarer Wärmegewinne während der Heizperiode die energetische Bilanz von Luftkollektoren bestimmt und bilanzierbar gemacht. In einem zweiten Schritt wird als ein Element zur passiven Kühlung die energetische Bilanz von Badgiren betrachtet. Ziel soll jedoch nicht die Einzelbetrachtung der beiden Elemente sein, sondern vielmehr die energetische Verknüpfung von Badgir und Luftkollektor zum passiven Klimatisierungssystem. Im dritten Schritt erfolgt daher die Untersuchung der

energetischen Bilanz von Luftkollektor und Badgir im energetischen Gesamtsystem, exemplarisch bewertet für die klimatischen Bedingungen Isfahan.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ursprünglich war Hauptziel meiner Arbeit, Konzepte zur Nutzung von Luftkollektoren und Badgiren, verknüpft zu passiven Klimatisierungs-Gesamtsystemen zu entwickeln. Die Systeme sollten sowohl während der Kühl-, als auch während der Heizperiode effizienz- und behaglichkeitssteigernd wirken. Die Konzepte sollten am Beispiel von Wohngebäuden in Isfahan entwickelt werden. Im Laufe der Bearbeitung zeigte sich jedoch, dass es bislang keine Möglichkeit gibt, Luftkollektoren und Badgire energetisch zu bilanzieren. Die Bewertung der Konzepte wäre nur mit Hilfe einer Vielzahl komplexer thermisch dynamischer Simulationen möglich gewesen, deren Ergebnisse kaum Rückschlüsse auf andere Projekte zugelassen hätten. Daher habe ich mich entschieden, im Rahmen meiner Dissertation zunächst die Lücke der Bilanzierungsmöglichkeit zu schließen.

Ziel der Arbeit ist daher eine energetische Bilanzierung für Luftkollektoren als architektonisch-konstruktives Heizelement sowie die energetische Bilanzierung für Badgire als architektonisch-konstruktives Kühlelement eines Gebäudes gemäß Bilanzierungssystematik für Gebäudebilanzierungen nach DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011) zu entwickeln.

Folgende Grafik zeigt die Struktur der Arbeit.

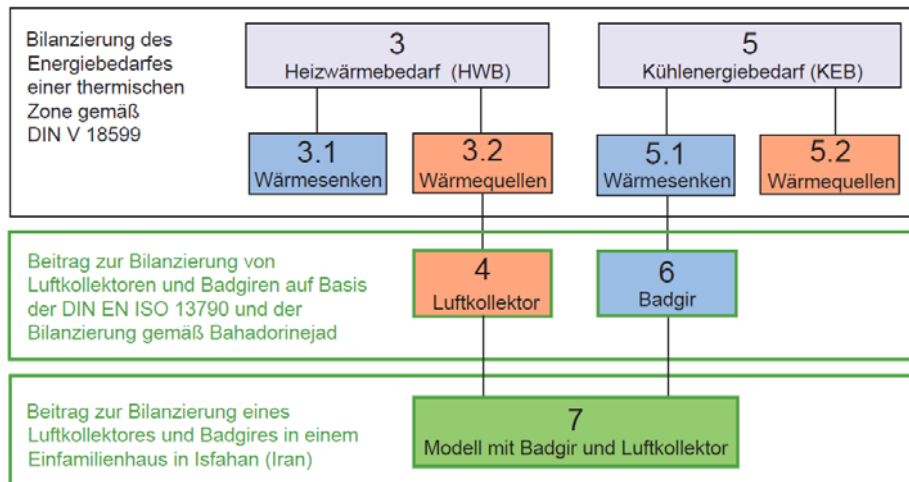


Abb. 1-3: Darstellung von Vorgehensweise dieser Arbeit

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bilanz für Luftkollektoren fließt als Solarwärmegewinne unter dem Bilanzierungspunkt Wärmequelle ein. Als Grundlage für die entwickelte Bilanzierung dient die DIN EN ISO 13790 (DIN EN ISO 13790 2008).

Der Kälteeintrag von Badgiren fließt als Lüftungswärmesenke während der Kühlperiode unter dem Bilanzierungspunkt „Wärmesenke“ ein. Als Grundlage für die

entwickelte Bilanzierung dient ein Sammelwerk von mehr als 300 Fachartikeln mit empirischen Daten (Bahadori, Dehghani 2008).

Die entwickelten Bilanzierungsansätze resultieren aus den genannten Quellen und sind harmonisiert mit der DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011).

Abschließend wird ein Gebäudekonzept, in dem Luftkollektor und Badgir im Gesamtsystem während der Kühl- sowie Heizperiode wirken, dargestellt und rechnerisch gemäß dieser Arbeit bilanziert.

2 Grundlagen

2.1 Thermische Behaglichkeit

Thermische Behaglichkeit ist das Wohlbefinden von Menschen in einem Gebäude. Sie ist abhängig von verschiedenen Faktoren (Spath 2010: 99).

- ✓ Physikalische Faktoren: Temperatur der umschließenden Flächen, Lufttemperatur, relative Feuchte, Luftbewegung, Luftdruck, Luftzusammensetzung, elektromagnetische Verträglichkeit, akustische Einflüsse und optische Einflüsse des zu betrachtenden Raum/ Gebäude.
- ✓ Physiologische und intermediäre Bedingungen: Raumbesetzung, Kleidung, Tätigkeit, Nahrungsaufnahme, ethnische Einflüsse, Alter, Geschlecht und körperliche Verfassung der Personen, individuelle Eingriffsmöglichkeiten, Adaption und Akklimatisation, Tages- und Jahresrhythmus, psychosoziale Faktoren und Konstruktion des zu betrachtenden Raum/ Gebäude.

Die thermische Behaglichkeit ist ein Qualitätskriterium für Heizung und Kühlung eines Gebäudes. Das Ziel dieser Arbeit ist letztendlich die thermischen Behaglichkeitskriterien einer Zone mit geringem Energiebedarf zu erfüllen. Aus diesem Grund wird zunächst die thermische Behaglichkeit auch normativ erklärt.

Die DIN EN ISO 7730 (DIN EN ISO 7730 2006) gilt als eine internationale Norm in der Bewertungskriterien für die thermische Behaglichkeit festgelegt sind. Sie wurde in Deutschland als erste Norm zur Bewertung von Behaglichkeitskriterien herangezogen. Es gibt deutsche Normen für Raumbehaglichkeit wie die DIN EN 15251 (DIN EN 15251 2012) und DIN 1946-2 (DIN 1946-2 1994). In der Regel werden statische Behaglichkeitsschwellen angesetzt. Die adaptive Behaglichkeit hingegen berücksichtigt die Gegebenheit, dass Innentemperaturen abhängig zur jeweilig herrschenden Außentemperatur als behaglich bzw. unbehaglich bewertet werden. Sie stellt die Behaglichkeitstemperatur daher in Abhängig von der Außentemperatur dar, ist adaptiv. Die folgende Abbildung stellt das adaptive Behaglichkeitsfeld gemäß DIN 1946-2 (DIN 1946-2 1994) dar.

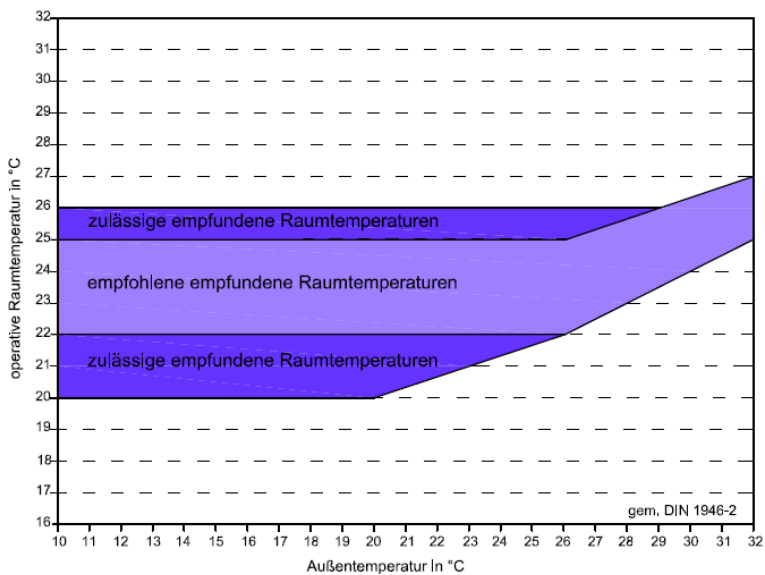


Abb. 2-1: adaptive Behaglichkeitsfeld (Eigene Darstellung nach DIN 1946-2 (DIN 1946-2 1994))

Im Iran verwendet man hauptsächlich die amerikanische Norm ASHEAE 55 (ASHREA 55 210). Die folgende Abbildung zeigt das adaptive Behaglichkeitsfeld gemäß ASHEAE 55 (ASHREA 55 210).

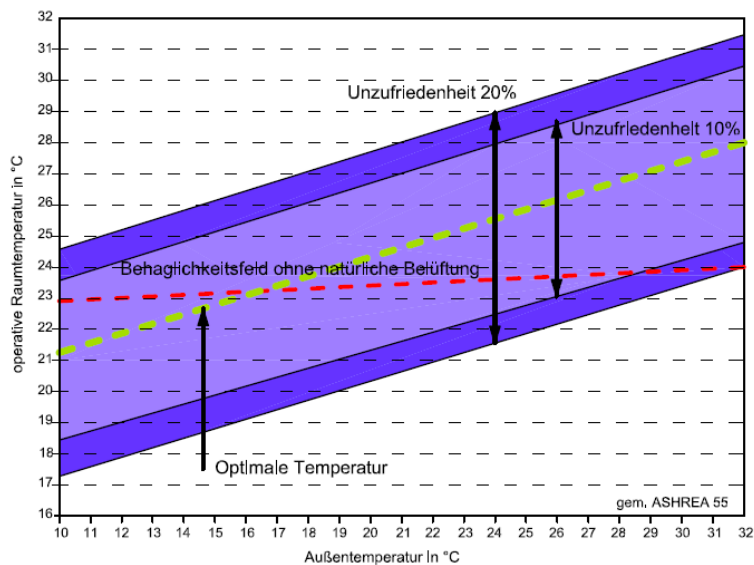


Abb. 2-2: adaptive Behaglichkeitsfeld (Eigene Darstellung nach ASHREA 55 (ASHREA 55 210))

Im Rahmen dieser Arbeit gelten die adaptiven Behaglichkeitsschwellen. Dies gewährleistet, dass die zur Klimatisierung genutzten Bauteile (passive Strategien) nicht für statische Schwellen und auf vereinzelte Extremsituationen, sondern auf den Außenbedingungen angepasste Anforderungen dimensioniert werden können. Die Arbeit verfolgt damit den Ansatz einer nutzerorientierten Ressourcenschonung.

2.2 Funktionsprinzip von Luftkollektoren

Luftkollektoren sind thermische Kollektoren, in denen Luft als Wärmeträger genutzt wird. Sie können als additive technische Geräte an der bestehenden Gebäudehülle angebracht werden, oder sind konstruktiver Teil der Gebäudehülle. Folgend werden Luftkollektoren betrachtet, die Teil der Gebäudehülle sind. Diese bestehen aus drei funktionalen Schichten:

- 1) Außenschicht: Die äußere, der Außenluft zugewandte Schicht wird durch eine meist wenige Zentimeter starke, nicht tragende, transparente, transluzente oder opake Schicht gebildet. Bei transparenter und transluzenter Schicht findet die Absorption im Innern des Bauteils statt, der Glashauseffekt wird genutzt. Bei opaken Kollektoren findet die Absorption auf der Außenoberfläche statt – opake Schichten sind, um eine gute Wärmeleitung nach innen zu gewährleisten, möglichst dünn.
- 2) Mittelschicht: Als mittlere Schicht fungiert die Luftschicht als Wärmeträger. Die Luftschicht kann ruhend oder belüftet sein und wirkt je nach konstruktiver Ausführung dynamisch.
- 3) Innenschicht: Die Innenschicht wird durch eine opake Schicht gebildet, die die beheizte Zone nach außen begrenzt. Die Innenschicht ist in der Regel die tragende Schicht der Außenwandkonstruktion. Sie kann aus Teilschichten bestehen (Bsp. Innenschicht bestehend aus Putzschicht, Mauerwerk, Putzschicht), bildet jedoch funktional eine Schicht.

Die Schichtenanordnung transparenter und opaker Luftkollektoren ist in folgender Abbildung dargestellt.

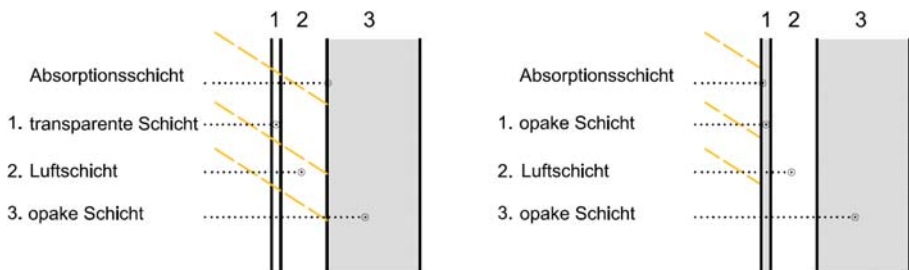


Abb. 2-3: Schichten transparenter und opaker Luftkollektoren (Eigene Darstellung)

Luftkollektoren machen sich die Umwandlung von Licht in Wärme (Absorption) zu Nutzen. Kurzwellige Sonnenstrahlung wird auf der Absorberschicht in Wärme umgewandelt.

Die kurzwellige Sonneneinstrahlung wird teilweise durch die transparente Außenschicht des Kollektors hindurchgelassen. Durch opake Schicht wird die Strahlung um Wärme umgewandelt. Ein Teil dieser Wärme wird zum hinter dem Kollektor liegendem Raum transportiert und anderen Teil wird als Verluste zur Umgebung abgegeben. Die transportierte Wärme zum Raum, die keine Überhitzung verursacht, wird als nutzbarer solaren Wärmeeintrag durch Luftkollektor bezeichnet.

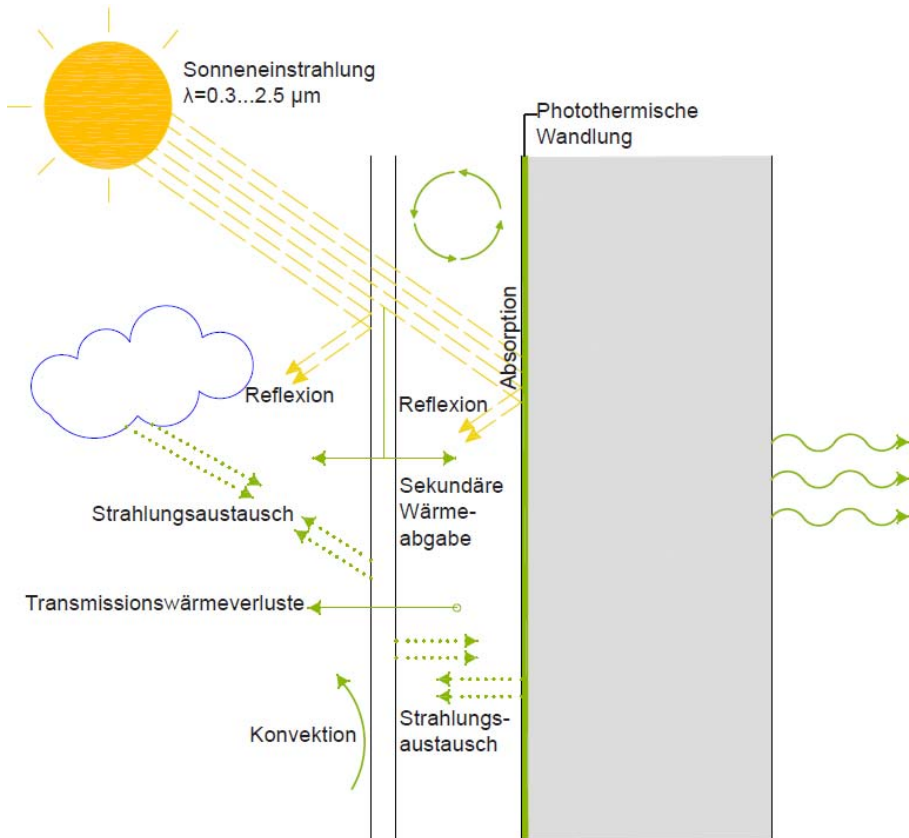


Abb. 2-4: Prinzip eines Luftkollektors (Eigene Darstellung)

Der Luftkollektor geht in die Bilanzierung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs eines Gebäudes nach 18599-2 als Wärmequelle ein. Der Wärmetransportmechanismus eines Luftkollektors kann unterschiedliche ausgebildet sein.

- Luftkollektor mit Transmissionswärmeeintrag (keine Belüftung des Luftraumes)
- Luftkollektor mit Konvektionswärmeeintrag (natürliche/ konvektive Belüftung des Luftraumes)
- Luftkollektor gekoppelt an TGA (mechanische Belüftung des Luftraumes)

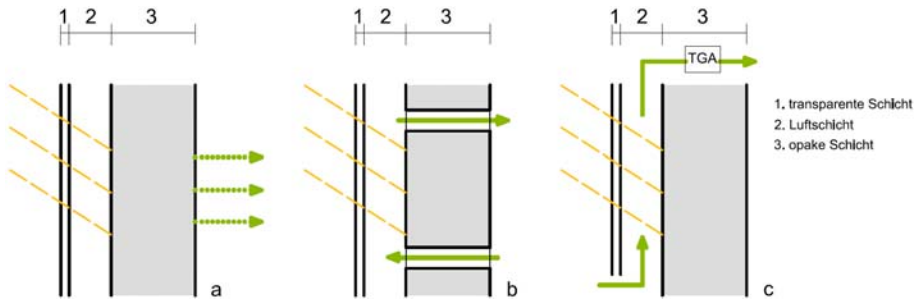


Abb. 2-5: Transportmethode der durch Kollektor erzeugten Wärme (Eigene Darstellung, Grundlage: (Tersluis, Bauer, Nasrollahi November 2015))

Es gibt eine Vielzahl von realisierten Gebäuden, in deren Energiekonzept Luftkollektoren eine fundamentale Rolle spielen. Folgende Abbildung zeigt das Funktionsprinzip von drei gebauten Beispielgebäuden, die mit Luftkollektor arbeiten. (Tersluis, Nasrollahi 11/2014)

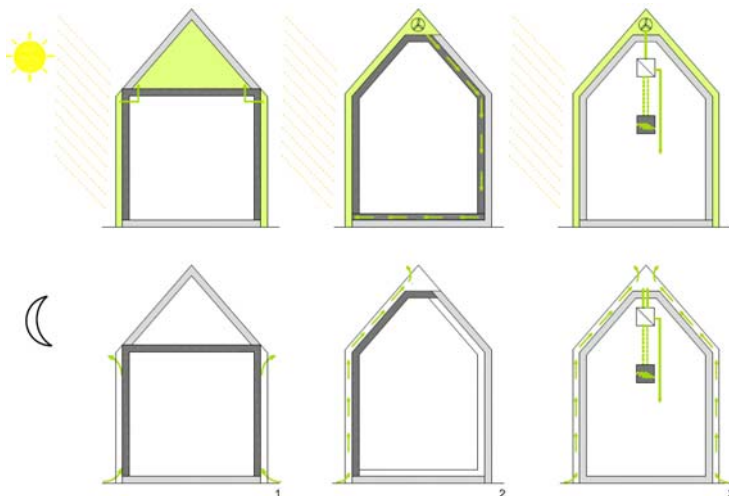


Abb. 2-6: realisierte Gebäude mit Luftkollektor (1) Wohn- und Atelierhaus Lang-Kröll; Florian Nagler Architekten, (2) Saniertes Einfamilienhaus; Burno Mauer (3) Kinderreitschule Weillendorf; Werner Grosse Architektur (Tersluis, Nasrollahi 11/2014)

Die energetische Wirkungsweise von Luftkollektoren ist durch das Monitoring an verschiedenen Gebäuden nachgewiesen. Das energetische Verhalten des Patchworkhaus' mit Luftkollektoren in Müllheim wurde mithilfe des Monitorings analysiert. Dadurch wurden die zuvor erstellten Simulationsergebnisse auch verifiziert. (Tersluis 2012)



Abb. 2-7: Patchworkhaus Müllheim (Ruedi Walti)

Der Luftkollektor wird in DIN-Normen nicht als separate Wärmequelle oder separates Bauteil bilanziert. Aber die Berechnung der Wärmegewinne durch den Kollektor wurde in DIN EN 832-1 (DIN EN 832-1 2003) eingefügt. In dieser Norm sind die Wärmegewinne durch verschiedene Solarwände bilanziert. Diese Norm ist jedoch nicht mehr gültig. Die gleiche Bilanzierung für Solarwände ist aktuell in DIN EN ISO 13790 (DIN EN ISO 13790 2008) dargestellt. Die s.g. Bilanzierungen sind für Luftkollektoren teilweise übertragbar.

2.3 Funktionsprinzip des Badgirs

Ein Badgir ist ein architektonisches Element, welches Perser seit Jahrhunderten in Gebäuden nutzen. Dieses Element wurde und wird verwendet, um Gebäude zu lüften und gleichzeitig zu kühlen (Bahadori, Dehghani 2008: 3). Übersetzt bedeutet der Begriff Badgir Windfänger (Bad=Wind, Gir=Fänger) (Yar-Shater 1991: 368). In Abb. 2-8 ist ein traditioneller Badgir abgebildet.



Abb. 2-8: Foto eines Badgirs in Yazd, Iran (Eigenes Foto)

Badgire dienen zur Klimatisierung von Gebäuden. Der Badgir sorgt für Luftaustausch zwischen Außen- und Innenluft, der Luftein- oder Austritt erfolgt über Badgiröffnungen

am Kopfpunkt und Raumöffnungen am Fußpunkt des Badgirs. Die Außenluft wird je nach Bedarf durch verschiedene Prinzipien wie Nachtkühlung, adiabate Kühlung, Erdschicht- oder Wasserkühlung vorkonditioniert.

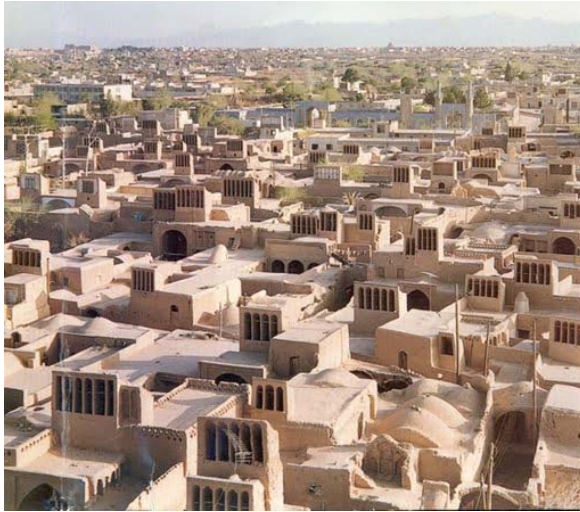


Abb. 2-9: Übersicht von Meybod (Iran) (Bahādūrī'nizhād, Dehghani-sanij, Sayigh, A. A. M.)

Badgire funktionieren durch Druckunterschiede zwischen Badgiröffnungen (Öffnung zwischen Badgir und Außen) und Raumöffnungen (Öffnung zwischen Badgir und Innenraum). Übliche Badgire können zwischen -50 und +50 Pascal Druckunterschied verursachen.

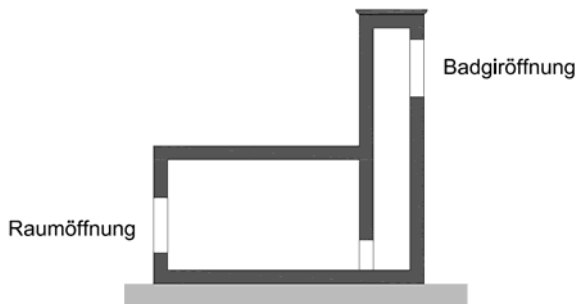


Abb. 2-10: Position von Badgiröffnung und Raumöffnung (Eigene Darstellung)

2.3.1 Badgir mit Überdruck

Die Klimata, in denen Badgire genutzt werden, weisen in der Regel hohe Tag- und geringe Nachttemperaturen auf. Die Nutzung der Nachtkühlung funktioniert in Kombination mit großen konstruktiven Speichermassen des Gebäudes daher sehr gut.

Bei der Nachtauskühlung in Folge Winddruck wird der vor der Badgiröffnung entstehende positive Druck genutzt, um kühle Nachtluft durch den Badgir in den Raum einströmen zu lassen. Dabei ist der Luftvolumenstrom sehr niedrig, wenn der Wind nicht weht. (Bahadori, Pakzad).

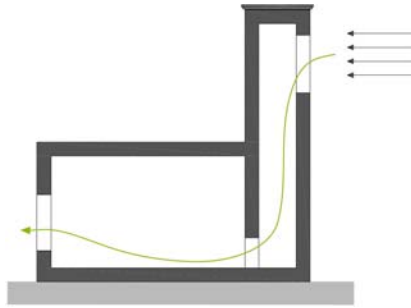


Abb. 2-11: Funktionsprinzip eines Badgirs mit Nachtkühlungsfunktion in Folge Überdruck (Eigene Darstellung)

Die warme Innenluft wird durch kühle Außenluft ersetzt, die Gebäudemasse entlädt sich (umgangssprachlich: speichert die Kühle der Nacht). Abb. 2-12 zeigt das Prinzip der Nachtkühlung in der Darstellung des Psychrometric Chart (Menerga 2009). Als Grundannahme gilt, dass der Wassergehalt der Innenluft und Außenluft gleich sind.

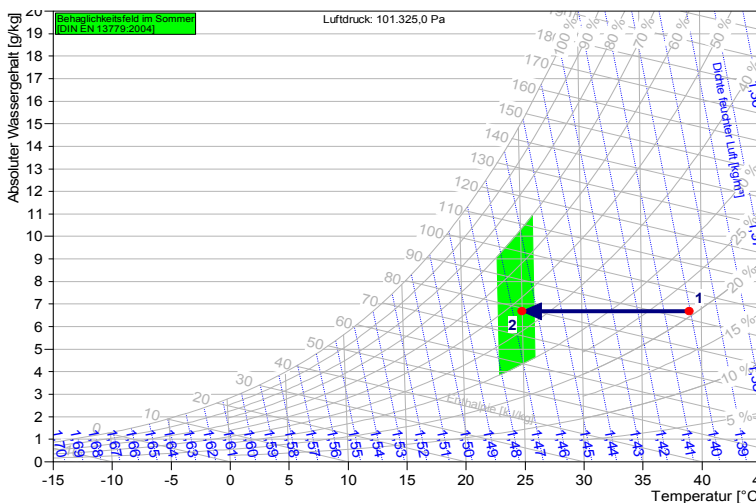


Abb. 2-12: das Prinzip der Nachtkühlung durch eines Badgires (Software: Menerga 2009)

Üblicherweise zwei Kühlmethoden in Badgiren benutzt wird. Sensible Kühlung und adiabate Kühlung. Die beiden Methoden können Abhängig von Höhe des kalten und warmen Luft Überdruck oder Unterdruck mitbringen.

Sensible Kühlung ist die Kühlung der Luft mit Änderung der Enthalpie der Luft. Adiabate Kühlung ist eine Methode zur Kühlung durch regenerative Energien. Bei dieser Art von Kühlung gibt die Luft Ihre Wärme durch Verdunstung des enthaltenen Wassers an dieses ab und wird kühl. Die adiabate Kühlung ist im Prinzip ein Wärmeaustausch zwischen Luft und dem enthaltenen Wasser. So bleibt die Enthalpie der Luft konstant aber die Luft wird kühler. Durch die adiabate Kühlung kann die Luft

idealerweise bis zur Feuchtkugeltemperatur der Luft gekühlt werden. Diese Kühlung ist in Regionen mit geringer relativen Feuchte effizienter, weil der Unterschied zwischen Trockenkugeltemperatur und Feuchtkugeltemperatur sehr hoch ist.

In manchen alten Badgiren sind die Badgiröffnungen mit Ästen, Stroh oder Filz abgedeckt. Die s.g. Materialien wurden manuell befeuchtet, um die durchströmende Luft durch Badgir adiabat zu kühlen. In diesem Fall verursachen außer Wind auch die Schwerkraft der feuchten Luft Überdruck. Deswegen lässt sich anschließend ein hoher Luftvolumenstrom zum Raum beobachten.

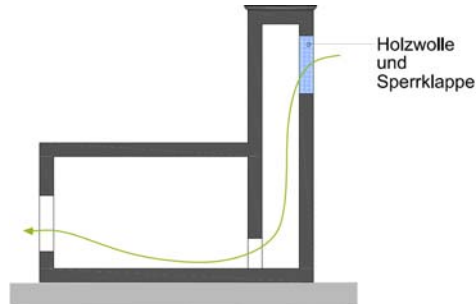


Abb. 2-13: Funktionsprinzip eines Badgirs mit adiabatischer Kühlung in Folge Überdruck (Eigene Darstellung)

Bei der adiabatischen Kühlung bleibt die Feuchtkugeltemperatur der Luft konstant. Die Abb. 2-14 stellt den adiabatischen Kühlungsverlauf auf den Menerga Psychrometric Chart (Menerga 2009) dar. Die Abbildung zeigt, dass der Verlauf parallel der Enthalpie Linien liegt, d. h. die enthaltene Wärmeenergie der Luft bleibt konstant.

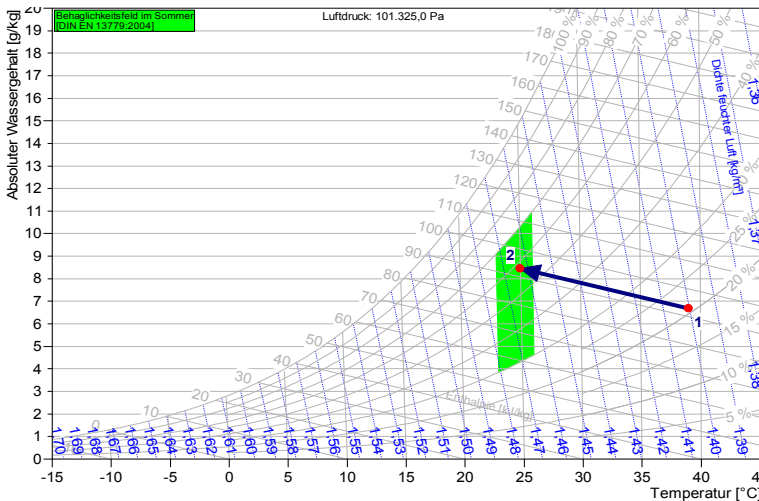


Abb. 2-14: das Prinzip der adiabatischen Kühlung durch eines Badgires (Software: Menerga 2009)

Eine weitere Möglichkeit, um mit Badgiren mit Überdruck Gebäude zu kühlen ist die Erdschichtkühlung. Die Klimata, in denen Badgire genutzt werden, weisen eine

ausreichend hohe Temperaturdifferenz zwischen Außenluft- und Erdreichtemperatur auf, sodass manche Badgire den Überdruck nutzen, um Außenluft durch das Erdreich strömen zu lassen und die Luft so zu kühlen. (siehe Abb. 2-15)

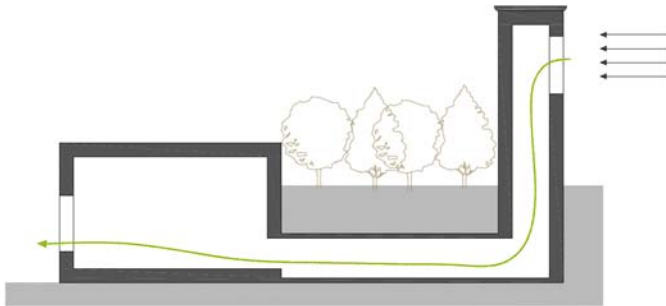


Abb. 2-15: Funktionsprinzip eines Badgirs mit Erdreichkühlung in Folge Überdruck (Eigene Darstellung)

Wenn die Umgebungsluft durch das Erdreich strömt kühlt diese durch Konvektion ab. (siehe Abb. 2-16 den Verlauf 3-4). Bei diesem Prinzip wird die Luft sensibel gekühlt.

Sobald das Erdreich nass ist, wird die Luft auch hier adiabatisch kühlt (siehe Abb. 2-16 den Verlauf 1-2)

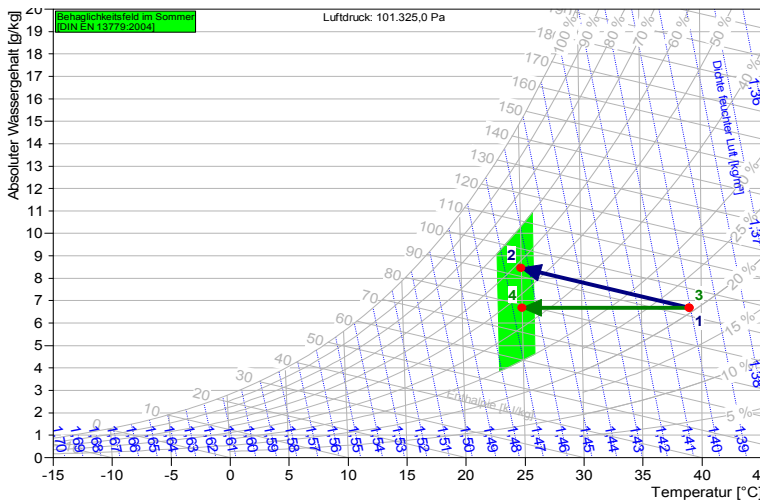


Abb. 2-16: das Prinzip der sensiblen adiabatischen Kühlung durch einen Badgirs (Software: Menerga 2009)

Mit dem gleichen Prinzip kühlt Badgirs die Luft durch Wasserkühlung. Fließendes Grundwasser hat annähernd konstante Temperaturen, in den betrachteten Klimaregionen sind diese sogar geringer als die Behaglichkeitstemperatur. Wasser hat eine hohe Wärmespeicherkapazität, weswegen die Wärme der Luft vom Grundwasser sehr effektiv aufgenommen werden kann, die Luft wird sensibel gekühlt. In diesem Fall wird die Luft durch das Grundwasser gleichzeitig adiabatisch gekühlt.

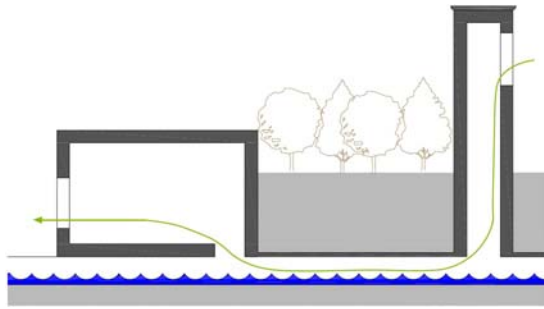


Abb. 2-17: Funktionsprinzip eines Badgirs mit Wasserkühlung in Folge Überdruck (Eigene Darstellung)

Mit Hilfe dieser Methode kann die Luft sehr effektiv gekühlt werden.

2.3.2 Badgir mit Unterdruck

Wenn der Luftdruck an Raumöffnung höher ist als der an der Badgiröffnung, dann funktioniert der Badgir mit Unterdruck, es entsteht ein Kamineffekte im Badgir. Auch hier können verschiedene Methoden zur Raumkühlung zum Einsatz kommen.

Bei der Nachtauskühlung in Folge Kaminwirkung sind zwei physikalische Parameter relevant. Zum einen spielt der Temperaturunterschied zwischen Badgir, der sich über den Tag hinweg aufgeheizt hat, und Raum eine Rolle. Darüber hinaus steht die Badgiröffnung höher als die Raumöffnung. Diese beiden Parameter bedingen, dass der Luftdruck im Badgir niedriger ist, als der der Raumluft. Es entsteht ein Auftrieb, der die Innenluft durch den Badgir absaugt. Wenn der Wind in Sommernächten nicht weht und keinen Luftdruckunterschied verursacht, geht der Luftstrom von Raumöffnung in Richtung Badgiröffnung.

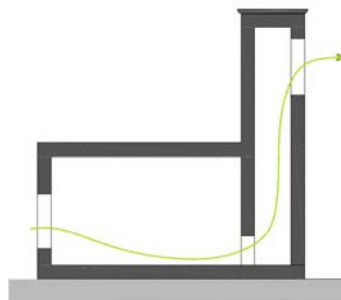


Abb. 2-18: Funktionsprinzip eines Badgirs mit Nachtkühlungsfunktion in Folge Unterdruck (Eigene Darstellung)

Wenn im Garten eines Gebäudes mit Badgir Wasserbecken, Bäume oder nasse Pflanzen stehen, wird die Luft vor der Raumöffnung adiabatisch gekühlt und strömt nach Innen. Die warme und trockene Innenraumluft zieht durch den Kamineffekt nach Außen und die adiabatisch gekühlte Außenluft kann durch die Raumöffnung nachströmen.

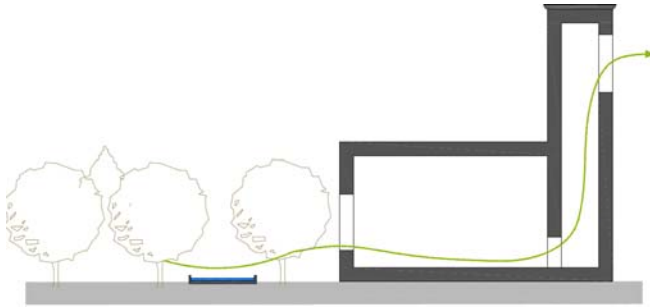


Abb. 2-19: Funktionsprinzip eines Badgirs mit adiabatische Kühlung in Folge Unterdruck (Eigene Darstellung)

Ein Badgir im Unterdruckbereich kann die Luft vom unteren Bereich nach Oben saugen. Es ermöglicht die Durchströmung des Erdreichs mit Luft. Mit dieser Methode kann die Umgebungsluft sensitiv oder adiabatisch durch das feuchte Erdreich gekühlt werden. (siehe Abb. 2-20).

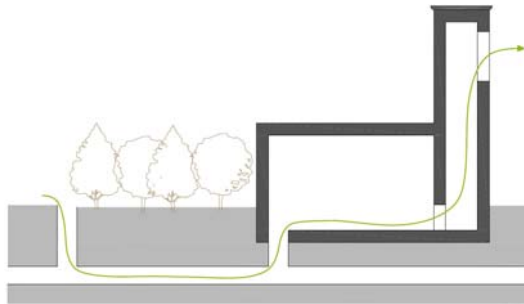


Abb. 2-20: Funktionsprinzip eines Badgirs mit Erdreichkühlung in Folge Unterdruck (Eigene Darstellung)

Mithilfe von fließendem Grundwasser ist auch eine Wasserkühlung machbar. Vgl. Wasserkühlung eines Badgirs in Folge von Überdruck.

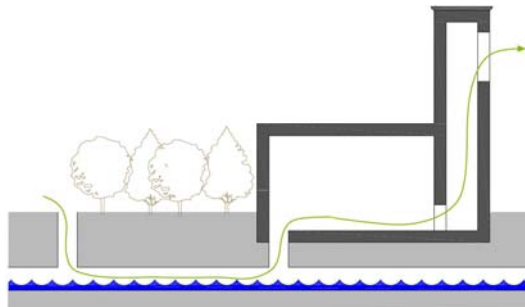


Abb. 2-21: Funktionsprinzip eines Badgirs mit Wasserkühlung in Folge Unterdruck (Eigene Darstellung)

In manchen alten Gebäuden werden Keller zur Lagerung von Lebensmitteln mit dieser Methode gekühlt. Beispielsweise wurde in einem Keller, bei einer Außentemperatur von 42°C durch die Wasserkühlung, eine Raumlufttemperatur von 10°C gemessen.

2.3.3 Badgir mit Überdruck und Unterdruck

Manche Badgire haben mehrere Öffnungen in unterschiedliche Ausrichtungen. Abhängig von der Windrichtung bzw. der Ausrichtung der Badgiröffnung kann der Druck an dieser Stelle positiv oder negativ sein. Daher kann ein Badgir durch die Positionierung unterschiedlich orientierter Öffnungen durch Druckunterschiede von Überdruck bis Unterdruck funktionieren. (siehe Abb. 2-22)

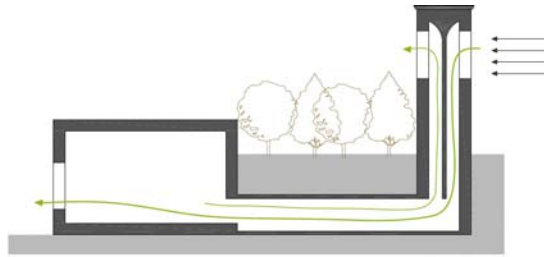


Abb. 2-22: Funktionsprinzip eines Badgirs in Folge Überdruck und Unterdruck (Eigene Darstellung)

Badgire mit Funktionsweisen in verschiedenen Druckbereichen (Druck / Sog) funktionieren nicht so effektiv wie reine Druck- oder Sogsysteme. Die klimatisierte Luft kann von einer Badgiröffnung zur anderen strömen, ohne den Raum zu klimatisieren (Druckausgleich Luftein- / Luftaustritt). Eine einfache Steuerung der Badgiröffnungen ist in traditionellen Badgiren nicht möglich, Effizienzverluste die Folge.

2.3.4 Moderner Badgir

Heute werden im Iran weiterhin Badgire gebaut, um eine passive Klimatisierung zu erreichen. Folgende Abbildung zeigt einen modernen Badgir, der durchgehend mit Überdruck funktioniert (Bahadori 1985)

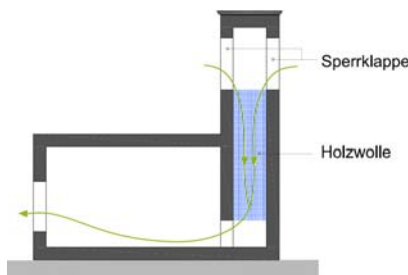


Abb. 2-23: Funktionsprinzip eines Badgirs in Folge Überdruck und Unterdruck (Eigene Darstellung)

Der Badgir nutzt zusätzlich zur Durchwindung die adiabate Kühlung. Im Badgir werden Strohmatte installiert, die bei Bedarf mit Hilfe einer Art Sprinkleranlage befeuchtet werden können und somit Kühlfunktionen übernehmen. Dieser Badgir hat einige Vorteile im Vergleich zu den traditionellen Badgiren (Bahadori, Dehghani 2008: 301):

- Die Luft in Badgir wird effektiv durch adiabatische Kühlung gekühlt und hat eine geringere Temperatur
- Der moderne Badgir funktioniert immer wegen der Schwerkraft von feuchte Luft im Badgir mit Überdruck, wobei traditionelle Badgire erst ab einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s mit Überdruck funktionieren
- Der Badgir kann im Gegensatz zu traditionellen Badgiren verschiedene Öffnungen in verschiedene Ausrichtungen haben, die alle gleichzeitig mit Überdruck funktionieren (Die Schwerkraft der feuchten Luft im Badgir verursacht Überdruck an der Badgiröffnung)

Ein weiterer moderner Badgir nutzt feuchte Flächen an den Badgiröffnungen. (Dehghani-sani, Soltani, Raahemifar 2015)

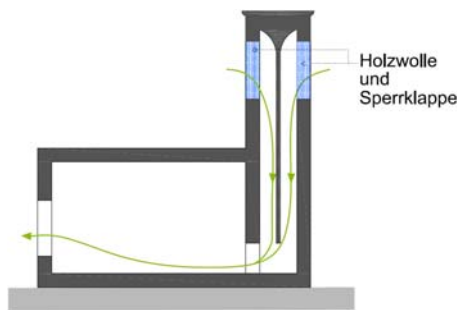


Abb. 2-24: Funktionsprinzip eines Badgirs in Folge Überdruck und Unterdruck (Eigene Darstellung)

Dieser Badgir funktioniert wie der vorher gezeigte, erzeugt jedoch wegen der größeren effektiven Höhe mehr Überdruck und erreicht daher eine bessere Kühlungseffizienz Energiebedarf einer Zone. (Bahādurī'nizhād, Ya'qūbī, Sa'dvandī 2007)

2.4 Energiebedarf einer Zone

Die energetische Bilanz eines Gebäudes setzt sich aus dem Heizenergiebedarf und dem Kühlenergiebedarf zusammen. Luftkollektoren können einen direkten Beitrag zur Senkung des Heizenergiebedarfes, Badgire zur Reduktion des Kühlenergiebedarfes bzw. beide zur Behaglichkeitssteigerung leisten. Luftkollektoren können je nach Einsatz im Gesamtsystem auch den Kühlenergiebedarf senken, was in dieser Arbeit konzeptionell, jedoch nicht bilanziell betrachtet wird. Folgend werden die genutzten Begriffe erläutert

2.4.1 Heizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf eines Gebäudes oder einer Zone ist der Bedarf an Wärmeeinträgen über ein Heizsystem, sodass ein bestimmtes Temperaturniveau aufrechterhalten wird. (DIN 4108-2 2011).

2.4.2 Kühlbedarf

Der Kühlbedarf eines Gebäudes oder einer Zone ist die Wärmeenergie die dem Raum/ Gebäude während der Kühlperiode entzogen werden muss, um die mittlere Innentemperatur auf einem bestimmte Niveau zu halten. (DIN V 18599-1 2011)

3 Bilanzierung des Heizwärmebedarfs einer Gebäudezone nach DIN V 18599-2

In den folgenden Teil-Kapiteln wird die Gedankenstruktur und Bilanzierungs-Systematik der DIN V 18599 vorgestellt. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Bilanzierungsbeiträge für Luftkollektoren und Badgire werden in einem weiteren Schritt in die Bilanzierungs-Systematik der DIN V 18599 integriert, so dass eine Gesamtbilanzierung von Gebäuden mit Luftkollektoren und Badgiren gemäß erweiterter DIN V 186599 erfolgen kann.

Heizwärme- und Kühlbedarf werden nach DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011) monatweise bilanziert. Die Berechnung erfolgt im Allgemeinen für einen durchschnittlichen Tag für jeden Monat. Alle Wärmequellen und Wärmesenken werden als Tageswerte für jeden Monat berechnet. Letztendlich wird aber der Heizwärmebedarf und Kühlbedarf monatlich zusammengefasst. Die Abb. 3-1 zeigt das Prinzip der Bilanzierung des Heizwärme- und Kühlbedarfs einer Gebäudezone.

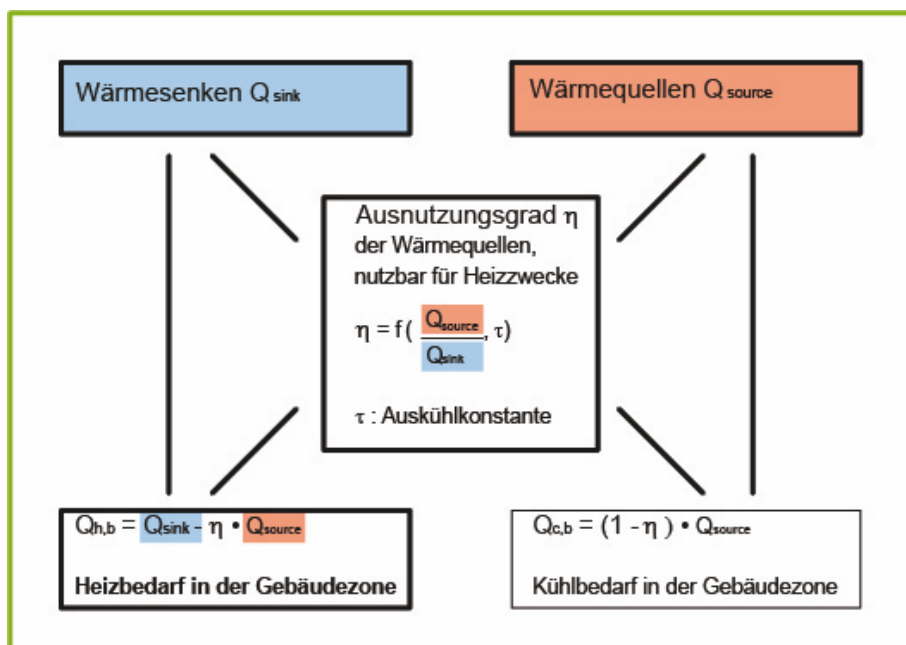


Abb. 3-1: Berechnungsprinzip des Heiz- und Kühlbedarfs einer Gebäudezone (DIN V 18599-2 2011)

$$\boxed{\text{Heizbedarf}} = \boxed{\text{Wärmeverluste}} - \left(\boxed{\text{Nutzungsgrad}} \star \boxed{\text{Wärmegewinne}} \right)$$

Der Heizwärmebedarf einer Zone ergibt sich aus der Überlagerung von Wärmesenken (Wärmeverluste) und Wärmequellen (Wärmegewinne). Da Wärmegewinne selten zu 100% nutzbar sind, Teile beispielsweise ungenutzt weggelüftet werden, werden die Wärmequellen mit einem Nutzungsgrad, der kleiner als 1 ist, multipliziert.

Die Berechnung gemäß DIN V 18599-2 lautet wie folgt:

$$Q_{h,b} = Q_{\text{sink}} - \eta Q_{\text{source}} \quad 3.1$$

mit:

- $Q_{h,b}$ der Heizwärmebedarf einer Gebäudezone
- Q_{sink} die Summe der Wärmesenken in der Gebäudezone unter den jeweiligen Randbedingungen
- Q_{source} die Summe der Wärmequellen in der Gebäudezone unter den jeweiligen Randbedingungen
- η der monatliche Ausnutzungsgrad der Wärmequellen

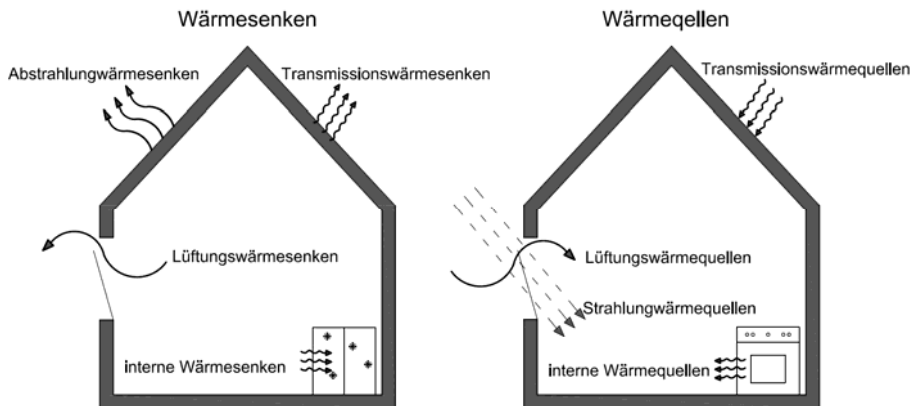


Abb. 3-2: Wärmesenken und Wärmequellen, die den Heizwärmebedarf eines Gebäudes beeinflussen (Eigene Darstellung)

In die Energiebilanz fließen folgende Wärmesenken und Wärmequellen ein:

- Transmissionswärmesenken oder –Wärmequellen, die auf Grund der Wärmeleitung in den Bauteilen und dem Wärmeübergang an den Bauteiloberflächen zu Gewinnen bzw. Verlusten führen,
- Lüftungswärmesenken oder –Wärmequellen, die auf Grund des Luftaustausches zwischen Außen- oder Innenluft oder mit angrenzenden Zonen zu Gewinnen bzw. Verlusten führen,
- solare Wärmequellen (Wärmeeinträge), die auf Grund solarer Einstrahlung auf opake Bauteile, durch transparente Bauteile oder auf Luftkollektoren zu Gewinnen führen,
- Wärmesenken, die durch Strahlungsabsorption und Wärmeabstrahlung an der Außenfläche an Bauteilen zu Verlusten führen,

- interne Wärme- oder Kältequellen, die durch technische Geräte, Beleuchtung, Körperwärme der Menschen oder Tiere sowie durch Luftkanäle zu Gewinnen oder Verlusten führen,

3.1 Wärmesenken Q_{sink}

Die Wärmesenken beziffern die Wärmeverluste der Zone durch Transmission, Lüftung, Kälteeinträgen von Lüftungsanlagen, internen Kältequellen und Abstrahlung

$$Q_{\text{sink}} = \sum Q_T + \sum Q_V + \sum Q_{i,\text{sink}} + \sum Q_S \quad 3.2$$

mit: Q_{sink} die gesamte Wärmesenken einer Gebäudezone

Q_T die Transmissionswärmesenken

Q_V die Lüftungswärmesenken

$Q_{i,\text{sink}}$ die interne Wärmesenken

Q_S die Wärmesenken durch Abstrahlung

3.1.1 Transmissionswärmesenken Q_T

Transmissionswärmeverluste entstehen, wenn an der Außenseite eines Bauteils geringere Temperaturen als an der Innenseite herrschen, also ein Temperaturgefälle von innen nach außen besteht. Als Innentemperatur wird die Innensolltemperatur nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011) angenommen.

Transmissionswärmesenken sind demnach die Summe aller Transmissionswärmeverluste durch das betrachtete Bauteil, die bedingt sind durch das jeweilige Temperaturgefälle zwischen der einen und der anderen Bauteilseite sowie die Dauer des Betrachtungszeitraumes.

Die Transmissionswärmeverluste ergeben sich aus der Summe der Wärmeverluste durch Außenbauteile und der Summe der Wärmeverluste durch Innenbauteile, die an unbeheizte Zonen angrenzen. Verluste werden erst ab 4°C Temperaturgefälle berücksichtigt (DIN V 18599-2 2011), was in der Regel dazu führt, dass geringer temperierte Zonen wie bspw. temporär beheizte Bäder nicht gesondert betrachtet werden. Daher wird im Rahmen der Bilanzierung von unbeheizten Räumen gesprochen.

Es gilt:

$$Q_T = \sum Q_{T,e} + \sum Q_{T,u} + \sum Q_{T,z} + \sum Q_{T,s} \quad 3.3$$

mit: Q_T die Summe der Transmissionswärmesenken

$Q_{T,e}$	die Transmissionswärmesenken durch Außenbauteile
$Q_{T,u}$	die Transmissionswärmesenken zu unbeheizten Gebäudezonen oder Vorbauten
$Q_{T,z}$	die Transmissionswärmesenken zu angrenzenden beheizten Gebäudezonen
$Q_{T,s}$	die Transmissionswärmesenken zum Erdreich

3.1.1.1 Transmission durch Außenbauteile

Während der Heizperiode hat die Außenluft eine geringere Temperatur als die beheizte Zone, ein Temperaturgefälle zwischen Innen-Solltemperatur und durchschnittlicher Außenlufttemperatur entsteht, der Wärmefluss erfolgt von innen nach außen. Es gilt:

$$Q_{T,e} = UA(\theta_i - \theta_e)t \quad 3.4$$

mit:	U	der Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils der Gebäudehülle, berechnet nach DIN EN ISO 6946 (DIN EN ISO 6946 2008) für opake Bauteile oder nach DIN V 4108-4 (DIN 4108-4 2012) für transparente Bauteile
	A	die Fläche eines Bauteils, das die Gebäudezone zur Außenluft hin begrenzt. Als Maße von Fenstern und Türen werden die lichten inneren Rohbauöffnungen angesetzt
	θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	θ_e	die durchschnittliche Außentemperatur des Monats
	t	die Dauer des Berechnungszeitraums

Der Wärmetransferkoeffizient wird aus den Wärmedurchgangskoeffizienten der einzelnen Bauteile und deren Flächen nach DIN EN ISO 13789 (DIN EN ISO 13789 2008) und DIN EN ISO 13370 (DIN EN ISO 13370 2008) berechnet. Die linienförmigen und punktförmigen Wärmebrücken sind berücksichtigt.

Ohne Nachweis kann der Wärmebrückenzuschlag $\Delta U_{WB} = 0,10$ [W/m².K] eingesetzt werden. Wenn die Außenbauteile auf der Innenseite gedämmt worden sind und in Massivdecken eingebunden sind, kann $\Delta U_{WB} = 0,15$ [W/m².K] eingesetzt werden. Mit Nachweis nach DIN 4108 Beiblatt 2 (DIN 4108 Beiblatt 2 2006) ist $\Delta U_{WB} = 0,05$ [W/m².K] zu setzen (DIN V 18599-2 2011).

3.1.1.2 Transmission zu unbeheizten Gebäudezonen oder Vorbauten

Während der Heizperiode hat eine unbeheizte Gebäudezone eine geringere Temperatur als eine beheizte Zone. Deshalb entstehen Transmissionswärmeverluste

durch das Innenbauteil einer beheizten Gebäudezone, das an eine unbeheizte Zone angrenzt. Die Transmissionswärmeverluste werden nach folgender Formel berechnet.

$$Q_{T,u} = UA(\theta_i - \theta_u)t \quad 3.5$$

mit: U	der Transmissionswärmetransferkoeffizient zwischen beheizten und unbeheizten Zonen nach DIN EN ISO 13789 (DIN EN ISO 13789 2008)
A	die Fläche eines Bauteils zwischen der betrachteten Gebäudezone und dem unbeheizten Bereich
θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
θ_u	die mittlere Temperatur der unbeheizten Gebäudezone
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

3.1.1.3 Transmission zu angrenzenden beheizten Gebäudezonen

Wärmeströme zwischen beheizter und angrenzender beheizter Zone werden berücksichtigt, wenn die Temperaturdifferenz zwischen zwei Zonen mehr als 4 K beträgt (DIN V 18599-2 2011).

$$Q_{T,z} = UA(\theta_i - \theta_z)t \quad 3.6$$

mit: U	der Transmissionswärmetransferkoeffizient zwischen beheizten und unbeheizten Zonen nach DIN EN ISO 13789 (DIN EN ISO 13789 2008)
A	die Fläche eines Bauteils zwischen den Gebäudezonen
θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
θ_z	die Bilanz-Innentemperatur der angrenzenden Gebäudezone
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

3.1.1.4 Transmission zum Erdreich

Die Erdreichtemperatur ist zu jedem Zeitpunkt geringer als die Raumsolltemperatur. Aus diesem Grund gibt es Wärmeverluste vom beheizten Innenraum über das angrenzende Bauteil zum Erdreich, die gemäß folgender Gleichung berechnet werden können.

$$Q_{T,s} = UA(\theta_i - \theta_e)t \quad 3.7$$

mit: U	der Wärmetransferkoeffizient über das Erdreich (H_G nach DIN EN ISO 13370 (DIN EN ISO 13370 2008))
A	die Fläche eines Bauteils auf dem Erdreich
θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
θ_e	die durchschnittliche monatliche Außentemperatur nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

3.1.2 Lüftungswärmesenken Q_v

Lüftungswärmesenken entstehen in Folge Infiltration durch Undichtigkeiten, durch natürliche und mechanische Lüftung sowie durch Luftaustausch mit angrenzenden Zonen.

Als Innentemperatur wird die Innensolltemperatur nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011) angenommen.

Lüftungswärmesenken sind die Summe aller Wärmeverluste durch Luftaustausch zwischen Innen- und Außenluft, die bedingt sind durch das jeweilige Temperaturgefälle zwischen Innen und Außen sowie die Dauer des Betrachtungszeitraumes.

Die Lüftungswärmeverluste ergeben sich aus der Summe der luftwechselbedingten Wärmeverluste durch Außenbauteile und der Summe der luftwechselbedingten Wärmeverluste durch Innenbauteile, die an unbeheizte Zonen angrenzen. Verluste werden erst ab 4°C Temperaturgefälle berücksichtigt (DIN V 18599-2 2011), was in der Regel dazu führt, dass geringer temperierte Zonen wie bspw. temporär beheizte Bäder nicht gesondert betrachtet werden (s. Transmissionswärmesenken).

Lüftungswärmesenken sind gegeben durch:

$$Q_v = \sum Q_{v,inf} + \sum Q_{v,win} + \sum Q_{v,mech} + \sum Q_{v,z} \quad 3.8$$

mit: Q_v	die Summe der Lüftungswärmesenken
$Q_{v,inf}$	die Lüftungswärmesenken durch Infiltration von Außenluft
$Q_{v,win}$	die Lüftungswärmesenken durch Fensterlüftung
$Q_{v,mech}$	die Kälteeinträge durch mechanische Lüftungsanlagen
$Q_{v,z}$	die Lüftungswärmesenken durch Luftaustausch von/zu anderen Zonen

3.1.2.1 Lüftungswärmesenken durch Infiltration von Außenluft

Aufgrund nicht steuerbarer ständiger Infiltration durch Undichtigkeit der Gebäudehülle strömt kältere Außenluft während der Heizperiode kontinuierlich nach innen, was

Wärmeverluste zur Folge hat. Lüftungswärmeverluste in Folge Infiltration sind bedingt durch die Lüftungsmenge, das jeweilige Temperaturgefälle sowie die Dauer des Betrachtungszeitraumes. Die Wärmesenken werden gemäß folgender Formel bilanziert.

$$Q_{V,inf} = n_{inf} V c_{P,a} \rho_a (\theta_i - \theta_e) t \quad 3.9$$

mit:	n_{inf}	der Tagesmittelwert des Infiltrationsluftwechsels
	V	das Nettoraumvolumen
	$c_{P,a}$	die spezifische Wärmekapazität von Luft
	ρ_a	die Dichte von Luft
	θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	θ_e	die durchschnittliche monatliche Außentemperatur nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	t	die Dauer des Berechnungszeitraums

$c_{P,a}$ kann 0,34 [Wh/m³·K] gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011)

3.1.2.2 Lüftungswärmesenken durch Fensterlüftung

Die Fensterlüftung verursacht wie die Infiltration Wärmesenken. Wärmeverluste in Folge Fensterlüftung sind bedingt durch die Lüftungsmenge, das jeweilige Temperaturgefälle sowie die Dauer des Betrachtungszeitraumes.

$$Q_{V,win} = n_{win} V c_{P,a} \rho_a (\theta_i - \theta_e) t \quad 3.10$$

mit:	n_{win}	der Tagesmittelwert der Fensterlüftung
	V	das Nettoraumvolumen
	$c_{P,a}$	die spezifische Wärmekapazität von Luft
	ρ_a	die Dichte von Luft.
	θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	θ_e	die durchschnittliche monatliche Außentemperatur nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	t	die Dauer des Berechnungszeitraums

3.1.2.3 Kälteeinträge durch mechanische Lüftungsanlagen

Eine mechanische Lüftung verursacht Kälteeinträge oder Wärmesenken, die bilanziert werden müssen. Da für den iranischen Wohnungsbau Lüftungsanlagen nicht relevant sind, entfällt die detaillierte Betrachtung.

3.1.2.4 Lüftungswärmesenken durch Luftaustausch von/zu anderen Zonen

Die Lüftungswärmesenken durch den Luftwechsel zwischen Gebäudezonen ohne mechanische Lüftung werden berücksichtigt, falls die Temperaturdifferenz mehr als 4 K ist (DIN V 18599-2 2011).

$$Q_{V,z} = \dot{V}_{z,d} c_{P,a} \rho_a (\theta_i - \theta_z) t \quad 3.11$$

mit:	$\dot{V}_{z,d}$	der eintretende Volumenstrom der benachbarten Zone im Mittel über den Tag
	V	das Nettoraumvolumen
	$c_{P,a}$	die spezifische Wärmekapazität von Luft
	ρ_a	die Dichte von Luft.
	θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	θ_z	die durchschnittliche Temperatur (Bilanz-Innentemperatur) in der Zone, aus der die Luft eintritt
	t	die Dauer des Berechnungszeitraums

$c_{P,a} \rho_a$ kann 0,34 [Wh/m³·K] gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011)

3.1.3 Interne Wärmesenken Q_i

Interne Wärmesenken entstehen durch Kälteeinträge im Innern der beheizten Zone. Hierzu gehören Energieverluste an Kühlsysteme, an Geräte oder Maschinen, die geringere Energieniveaus als die Raumluft aufweisen, oder an Güter wie bspw. große Mengen Gefriergut, das der Raumluft Energie entziehen kann.

Die Summe der internen Wärmesenken kann wie folgt berechnet werden:

$$Q_{i,sink} = \sum Q_{i,sink,c} + \sum Q_{i,sink,fac} + \sum Q_{i,sink,goods} \quad 3.12$$

mit:	$Q_{i,sink}$	Interne Wärmesenken
	$Q_{i,sink,c}$	der Kälteeintrag durch Kühlsysteme

$Q_{l,sink,fac}$ der Kälteeintrag durch Geräte oder Maschinen

$Q_{l,sink,goods}$ der Kälteeintrag durch in die Gebäudezone eingebrachte Güter mit Temperaturen unter der Innentemperatur

3.1.3.1 Kälteeintrag durch Kühlsystem

Durch Erzeugung und Verteilung der Zuluft der mechanischen Lüftung und des Kühlsystems entstehen Wärmesenken innerhalb der zu bilanzierenden Gebäudezone. Diese Wärmesenken werden gemäß der unteren Formel berechnet.

$$Q_{l,sink,c} = Q_{l,vc} + Q_{l,c} \quad 3.13$$

mit: $Q_{l,vc}$ der unregelmäßige Kälteeintrag in die Zone durch mechanische Lüftung (z. B. Verluste aus Verteilung) nach DIN V 18599-6 (DIN V 18599-6 2011) und DIN V 18599-7 (DIN V 18599-7 2011)

$Q_{l,c}$ der unregelmäßige Kälteeintrag in die Zone durch das Kühlsystem/die Kälteerzeugung (z. B. Verteilung, Speicherung, gegebenenfalls Erzeugung in der Zone) nach DIN V 18599-6 (DIN V 18599-6 2011) und DIN V 18599-7 (DIN V 18599-7 2011)

3.1.3.2 Wärmesenken durch Geräte und Maschinen

Geräte und Maschinen, die der Gebäudezone Energie entziehen und deren Wärmelast gleichzeitig außerhalb der zu bilanzierenden Zone abgeführt wird, werden als Wärmesenke bilanziert. Wärmesenken durch Geräte und Maschinen kommen im Wohnungsbau selten vor, werden daher im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

3.1.3.3 Wärmesenken durch Stofftransport

Stoffe oder Güter, die wesentlich von der Innenraum-Solltemperatur abweichen, entziehen der zu bilanzierenden Zone Energie. Bei regelmäßigen Einbringen solcher Stoffe in die Gebäudezone muss die Energiemenge als Wärmesenke berechnet werden. Da im Wohnungsbau Wärmesenken durch Stofftransporte nicht relevant sind, werden diese im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

3.1.4 Wärmesenken durch Abstrahlung

Die Wärmesenken durch Abstrahlung, die infolge der Temperaturdifferenz zwischen dem betrachteten Bauteil und Himmeltemperatur entstehen, werden als im Rahmen der Bilanzierung der Solarwärmegewinne in Teil 3.2.1.2 berechnet.

3.2 Bilanzierung der Wärmequellen Q_{source}

Wärmequellen stellen Wärmegewinne für die zu bilanzierenden Gebäudezonen dar. Zu den zur Verfügung stehenden Wärmegewinnen gehören die solaren Gewinne einer Gebäudezone, ggf. Transmissionswärmequellen, Lüftungswärmequellen sowie alle

internen Wärmequellen bspw. Geräte oder Menschen. Da Wärmegewinne in der Regel nicht konstant zur Verfügung stehen, sind sie nur teilweise nutzbar. Daher wird nur der nutzbare Teil der Wärmequellen vom Heizwärmebedarf als nutzbare Gewinne abgezogen.

$$Q_{\text{source}} = \sum Q_S + \sum Q_T + \sum Q_V + \sum Q_{\text{l,source}} \quad 3.14$$

mit:	Q_{source}	die Summe der Wärmequellen in der Gebäudezone
	Q_S	die Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung
	Q_T	die Transmissionswärmequellen
	Q_V	die Lüftungswärmequellen nach
	$Q_{\text{l,source}}$	die internen Wärmequellen in der betrachteten Gebäudezone

3.2.1 Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung Q_S

Solare Einstrahlung führt zu Wärmeeinträgen durch transparente Bauteile. Hierbei wird die Sonnenstrahlung auf raumzugewandten opaken Flächen der betrachteten Gebäudezone absorbiert und in Wärme umgewandelt. Gleichmaßen führt die Absorption von Solarstrahlung auf opaken Außenbauteilen zur Wärmeleitung durch das Außenbauteil hindurch zum Innenraum bzw. zur Reduktion der Verluste von innen nach außen. Die solaren Gewinne setzen sich wie folgt zusammen:

$$Q_S = \sum Q_{S,\text{tr}} + \sum Q_{S,\text{opak}} \quad 3.15$$

mit:	Q_S	die Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung
	$Q_{S,\text{tr}}$	die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung durch transparente Bauteile
	$Q_{S,\text{opak}}$	die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung auf opake Flächen.

3.2.1.1 Wärmequellen durch solare Einstrahlung durch transparente Flächen

Solare Gewinne durch transparente Bauteile sind abhängig von der effektiven Fläche des Bauteils, vom Gesamtenergiedurchlassgrad der transparenten Fläche, der Dichte der eintreffenden Solarstrahlung auf das Bauteil und der Einstrahlungs-Dauer. Architektonisch beeinflussbar sind die Ausrichtung der transparenten Bauteile und die Qualität der Fensterbauteile. Gebäude mit effektiv ausgerichteten und bemessenen Fensterflächen mit hohem Gesamtenergiedurchlassgrad können durch solare Wärmegewinne, vor allem im Wohnungsbau, einen großen Teil des Energiebedarfs decken. Solare Wärmegewinne werden wie folgt bilanziert:

$$Q_{S,\text{tr}} = F_f A g_{\text{eff}} I_s t \quad 3.16$$

mit:		der Abminderungsfaktor für den Rahmenanteil; sofern keine genaueren Werte bekannt sind, wird auf 0,7 gesetzt, für Dachoberlicht- und schlanke Wintergartenkonstruktionen auf 0,9.
F_f		
A		die Fläche des Bauteils, anzusetzen sind die lichten Rohbaumaße (Bruttofläche)
g_{eff}		der wirksame Gesamtenergiedurchlassgrad nach DIN EN 13363-1 (DIN EN 13363-1 2007) oder DIN EN 13363-2 (DIN EN 13363-2 2005), bei Folien gegebenenfalls nach DIN EN 410 (DIN EN 410 2011b)
I_s		die mittlere solare Einstrahlung während des Monats nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
t		die Dauer des Berechnungszeitraums

3.2.1.2 Wärmequellen durch solare Einstrahlung auf opake Fläche

Solarwärmegewinne, die auf opaken Außenbauteilen absorbiert und nach innen geleitet werden, sind abhängig von der eintreffenden Solarstrahlung, dem Absorptionsvermögen des Bauteils sowie dem Wärmewiderstand des opaken Bauteils. Je höher der Wärmewiderstand bzw. je geringer der U-Wert der Wand, desto geringer sind die Wärmegewinne durch das opake Bauteil. Die Gewinne werden gemäß folgender Formel berechnet:

$$Q_{S,\text{opak}} = R_{\text{se}} U A (\alpha I_s - F_f h_r \Delta \theta_{\text{er}}) t \quad 3.17$$

mit:	R_{se}	der äußere Wärmeübergangswiderstand
	U	der Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils
	A	die Gesamtfläche des Bauteils in einer Orientierung
	α	der Absorptionskoeffizient des Bauteils für Solarstrahlung nach DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011)
	I_s	die globale Sonneneinstrahlung für die Orientierung der Bauteilfläche nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	F_f	der Formfaktor zwischen dem Bauteil und dem Himmel: $F_f = 1$ für waagerechte Bauteile bis 45° Neigung; $F_f = 0,5$ für senkrechte Bauteile größer 45° Neigung
	h_r	der äußere Abstrahlungskoeffizient nach DIN 6946 (DIN EN ISO 6946 2008)
	$\Delta \theta_{\text{er}}$	die mittlere Differenz zwischen der Temperatur der Umgebungsluft und der scheinbaren Temperatur des Himmels; vereinfachend kann 10 K angenommen werden

t die Dauer des Berechnungszeitraums

3.2.2 Transmissionswärmeeinträge QT

Transmissionswärmeeinträge entstehen, wenn an der Innenseite eines Bauteils geringere Temperaturen als an der Außenseite herrschen, also ein Temperaturgefälle von außen nach innen besteht. Als Innentemperatur wird die Innensolltemperatur nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011) angenommen.

Die Transmissionswärmeeinträge ergeben sich aus der Summe der Wärmeeinträge durch Außenbauteile und der Summe der Wärmeeinträge durch Innenbauteile, die an unbeheizte Zonen angrenzen. Gewinne werden erst ab 4°C Temperaturgefälle berücksichtigt (DIN V 18599-2 2011). Ein Transmissionswärmeeintrag kann auch durch Erdreich entstehen, wenn das Erdreich aktiv als saisonaler Wärmespeicher genutzt wird.

Da Transmissionswärmeeinträge für den iranischen Wohnungsbau im Sinne dieser Arbeit nicht relevant sind, entfällt die detaillierte Betrachtung.

3.2.3 Lüftungswärmeeinträge QV

Lüftungswärmeeinträge treten beispielweise durch beheizte Zuluft einer Lüftungsanlage auf. Infiltration und Fensterlüftung werden in Ausnahmefällen als Wärmeeinträge dargestellt, wenn die durchschnittliche Außentemperatur über der Innentemperatur liegt.

$$Q_V = \sum Q_{V,inf} + \sum Q_{V,win} + \sum Q_{V,mech} + \sum Q_{V,z} \quad 3.18$$

mit:	Q_V	die Summe der Lüftungswärmeeinträge
	$Q_{V,inf}$	die Lüftungswärmeeinträge durch Infiltration von Außenluft
	$Q_{V,win}$	die Lüftungswärmeeinträge durch Fensterlüftung
	$Q_{V,mech}$	die Lüftungswärmeeinträge durch mechanische Lüftungsanlagen
	$Q_{V,z}$	die Lüftungswärmeeinträge durch Luftaustausch von/zu anderen Zonen

Im iranischen Wohnungsbau ist nur die Lüftungswärmeeinträge durch mechanische Lüftung im Laufe der Heizperiode relevant. Aus diesem Grund wird nur dies als Bilanzierungs-Teil detailliert betrachtet.

3.2.3.1 Wärmeeinträge durch mechanische Lüftungsanlagen

Durch eine Lüftungsanlage oder einen Lüftungswärmerückgewinner können Lüftungswärmegewinne im Laufe der Heizperiode entstehen. Die s.g. Wärmegewinne sind nach folgender Gleichung zu bilanzieren.

$$Q_{V,mech} = n_{mech} V c_{P,a} \rho_a (\theta_{V,mech} - \theta_i) t \quad 3.19$$

mit:

n_{mech}	der Tagesmittelwert des Luftwechsel durch mechanische Lüftung
V	das Nettoraumvolumen
$c_{P,a}$	die spezifische Wärmekapazität von Luft
ρ_a	die Dichte von Luft.
$\theta_{V,mech}$	Lufttemperatur der Zuluft der mechanischen Lüftungsanlage
θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

$c_{P,a} \rho_a$ kann 0,34 [Wh/m³·K] gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011).

3.2.4 Interne Wärmequellen Q_i

Interne Wärmequellen sind in folgender Gleichung zusammengefasst:

$$Q_{i,source} = \sum Q_{i,source,p} + \sum Q_{i,source,l} + \sum Q_{i,source,fac} + \sum Q_{i,source,goods} + \sum Q_{i,source,h} \quad 3.20$$

mit:

$Q_{i,source}$	Interne Wärmequellen
$Q_{i,source,p}$	der Wärmeeintrag durch Personen
$Q_{i,source,l}$	der Wärmeeintrag durch künstliche Beleuchtung
$Q_{i,source,fac}$	der Wärmeeintrag durch Geräte und Maschinen
$Q_{i,source,goods}$	Der Wärmeeintrag durch in die Gebäudezone eingebrachte Güter
$Q_{i,source,h}$	der Wärmeeintrag/Kälteeintrag durch Heiz- und Kühlsysteme

3.2.4.1 Wärmequelle durch Personen

Die abgegebene Wärme durch Personen ist abhängig von deren Anzahl und deren Aktivität. Gemäß DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011) wird die Wärmequelle durch Personen abhängig von der Bezugsfläche der Gebäudezone betrachtet. Die Wärmeabgabe ist nach folgende Formel zu bilanzieren:

$$Q_{l,source,p} = Q_{l,p} A_B \quad 3.21$$

mit: $Q_{l,p}$ die durchschnittliche tägliche Wärmeabgabe von Personen, bezogen auf die Bezugsfläche nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)

A_B die Bezugsfläche der Gebäudezone

3.2.4.2 Wärmequellen durch künstliche Beleuchtung

Ein großer Teil der für künstliche Beleuchtung aufgewandten elektrischen Energie wird bislang in Wärme umwandelt. Daher werden Wärmeerträge durch künstliche Beleuchtung in der Gebäudezone als Wärmequelle bilanziert. Bezogen auf die betrachtete Gebäudezone, in der ein Teil der erzeugten Wärme durch Abluft abtransportiert wird, wird ein Raumbelastungsgrad als Faktor berücksichtigt. Die Wärmegewinne durch künstliche Beleuchtung einer Gebäudezone sind nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$Q_{l,source,l} = \mu_l Q_{l,f} \quad 3.22$$

mit: μ_l der Raumbelastungsgrad für die Beleuchtung nach DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011)

$Q_{l,f}$ der durchschnittliche tägliche elektrische Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung nach DIN V 18599-4 (DIN V 18599-4 2011)

Wenn die Gebäudezone keine Abluftleuchten hat, gilt $\mu_l = 1$

3.2.4.1 Wärmequellen durch Geräte und Maschinen

Elektrische Geräte und Maschinen, die in der Gebäudezone im Betrieb sind, erzeugen Wärme. Diese erzeugen Wärme wird flächenbezogen wie folgt bilanziert:

$$Q_{l,source,fac} = q_{l,fac} A_B \quad 3.23$$

mit: $q_{l,fac}$ die durchschnittliche tägliche Wärmeabgabe von Geräten oder Maschinen, bezogen auf die Bezugsfläche nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)

A_B die Bezugsfläche der Gebäudezone

3.2.4.2 Wärmequellen durch Stofftransport

In Wohngebäuden gibt es keine die Energiebilanz bedingenden regelmäßigen Stoffe oder Güter, die in die Gebäude eingebracht werden. Daher werden Wärmegewinne durch Stofftransport nicht detailliert betrachtet.

3.2.4.3 Wärmequellen/-senken durch Heiz-, Trinkwasser- und Lüftungssystem

Wärme- und Kälteeinträge durch Anlagensysteme wie Heizung, Kühlung, Lüftung und Trinkwarmwasser, können auch in Wohngebäuden entstehen. Die Wärme- und Kältequellen kommen normalerweise durch Energieerzeugung, Energiespeicherung, Verteilung der Energie (Luftkanäle und Rohren) und Hilfsenergie der Anlagen wie Ventilatoren zu Stande. Die Wärme- und Kälteabgabe ist in der Gebäudezone unregelt und kann nicht einfach gemittelt berechnet werden. Diese Wärmequellen und Wärmesenken werden in dieser Arbeit daher nur benannt.

$$Q_{l,source,h} = Q_{l,w} + Q_{l,h} + Q_{l,vh} + Q_{l,ch} \quad 3.24$$

- mit:
- $Q_{l,w}$ der unregelte Wärmeeintrag in die Zone durch das Trinkwarmwassersystem nach DIN V 18599-8 (DIN V 18599-8 2011)
 - $Q_{l,h}$ der unregelte Wärmeeintrag in die Zone durch das Heizungssystem DIN V 18599-5 und aus DIN V 18599-7 (DIN V 18599-7 2011)
 - $Q_{l,vh}$ der unregelte Wärmeeintrag in die Zone durch mechanische Lüftung nach DIN V 18599-6 (DIN V 18599-6 2011) und DIN V 18599-7 (DIN V 18599-7 2011)
 - $Q_{l,ch}$ der unregelte Wärmeeintrag in die Zone durch das Kühlsystem/die Kälteerzeugung (gegebenenfalls Erzeugung in der Zone) nach DIN V 18599-7 (DIN V 18599-7 2011)

3.3 Ausnutzungsgrad für Wärmequellen η

Unter Ausnutzungsgrad versteht wird ausgedrückt, welcher Anteil der zur Verfügung stehenden Wärmegewinne einer Wärmequelle in der betrachteten Gebäudezone nutzbar ist. Im Prinzip zeigt dieser Wert näherungsweise das Verhältnis von vorhandenen Wärmegewinnen zu den vorhandenen Wärmesenken.

In der Heizperiode wird eine Erhöhung der Innentemperatur um 2 Kelvin im Vergleich zur Solltemperatur im Ausnutzungsgrad berücksichtigt. Die Kühlperiode beinhaltet der Ausnutzungsgrad eine Reduktion um 2 Kelvin. Da der Ausnutzungsgrad im starken Maß von den vorhandenen Wärmequellen und Wärmesenken der Gebäudezone abhängig ist, und im Heizfall und Kühlfall unterschiedliche Randbedingungen gelten, muss der Ausnutzungsgrad für jeden Fall gesondert berechnet werden. Die Ausnutzungsgrad ist nach folgender Formel zu berechnen:

$$\eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} \quad \text{Wenn } \gamma \neq 1 \quad 3.25$$

Und

$$\eta = \frac{a}{a + 1} \quad \text{Wenn } \gamma = 1 \quad 3.26$$

mit: η Ausnutzungsgrad
 γ das Verhältnis der Wärmequellen zu Wärmesenken nach Formel 3.27
 a ein numerischer Parameter nach Formel 3.28

$$\gamma = \frac{Q_{\text{source}}}{Q_{\text{sink}}} \quad 3.27$$

mit: Q_{source} die Summe der Wärmequellen in der Gebäudezone unter den jeweiligen Randbedingungen
 Q_{sink} die Summe der Wärmesenken in der Gebäudezone unter den jeweiligen Randbedingungen

$$a = a_0 + \frac{\tau}{\tau_0} \quad 3.28$$

mit: a_0 die numerische Parameter mit dem Wert $a_0 = 1$
 τ die numerische Parameter nach Formel 3.29
 τ_0 die numerische Parameter mit dem Wert 16 h

$$\tau = \frac{C_{\text{wirk}}}{H} = \frac{C_{\text{wirk}}}{\sum_j \left((U_j A_j) + \Delta U_{\text{WB}} \sum A_j \right) \cdot F_x + \sum_k \left((n_{\text{inf}} + n_{\text{win}}) V + \dot{V}_{\text{z,d}} \right) c_{p,a} \rho_a + H_{\text{V,mech},9}} \quad 3.29$$

mit: C_{wirk} Wirksame Wärmekapazität der Gebäudezone, für leichte Gebäudezone 50 [Wh/(m².K) Ab], für mittlere Gebäudezone 90 [Wh/(m².K) Ab], für schwere Gebäudezone 130 [Wh/(m².K) Ab]

U_j der Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils der Gebäudehülle

A_j die Fläche des Bauteils

ΔU_{WB} der Wärmebrückenzuschlag, Ohne Nachweis kann der Wärmebrückenzuschlag $\Delta U_{\text{WB}} = 0,10$ [W/m².K] eingesetzt werden. Wenn die Außenbauteile auf der Innenseite gedämmt worden sind und in Massivdecken eingebunden sind, kann $\Delta U_{\text{WB}} = 0,15$

	[W/m ² .K] eingesetzt werden. Mit Nachweis nach DIN 4108 Beiblatt 2 (DIN 4108 Beiblatt 2 2006) ist $\Delta U_{WB} = 0,05$ [W/m ² .K] zu setzen (DIN V 18599-2 2011)
F_x	Temperatur-Korrekturfaktor für die Berechnung der Zeitkonstante, für Außenbauteile und Bauteile am Erdreich $F_x=1$ nach DIN EN ISO 13370 (DIN EN ISO 13370 2008) und für alle andere Bauteile $F_x=0.5$
n_{inf}	der Tagesmittelwert des Infiltrationsluftwechsels
n_{win}	der Tagesmittelwert der Fensterlüftung
V	das Nettoraumvolumen
$\dot{V}_{z,d}$	die Lüftungswärmesenken durch Luftaustausch von/zu anderen Zonen
c_{pa}	die spezifische Wärmekapazität von Luft
ρ_a	die Dichte von Luft
$H_{V,mech,g}$	der temperaturgewichtete Wärmetransferkoeffizient der mechanischen Lüftung

Für RLT-Anlagen als Kühlungsanlage kann der temperaturgewichtete Wärmetransferkoeffizient der mechanischen Lüftung nach Formel (3.53) berechnet werden. Für Heizfall ist aber $H_{V,mech,g}=0$

$$H_{V,mech,g} = H_{V,mech} \frac{\theta_{i,soll} - \theta_{V,mech}}{6} \quad 3.30$$

mit:	$H_{V,mech}$	der Lüftungswärmetransferkoeffizient der mechanischen Lüftung
	$\theta_{i,soll}$	für den Heizfall: ($\theta_{i,soll} = \theta_{i,h,soll}$); für den Kühlfall: ($\theta_{i,soll} = \theta_{i,h,soll} - 2$ K)
	$\theta_{V,mech}$	die Summe der Transmissionswärmetransferkoeffizienten

Die Ausnutzungsgrad der Wärmequellen ist mit der gleichen Methode für den Heizfall und den Kühlfall monatlich zu berechnen.

4 Energetische Bilanzierung des Luftkollektors harmonisiert mit der Bilanzierung nach DIN V 18599-2

Ein Luftkollektor besteht von innen nach außen beschrieben aus einem opaken Bauteil, einer Luftschicht und einer transparenten, transluzenten oder dünnen, opaken Deckschicht. Dieser Schichtaufbau ermöglicht die Nutzung des Treibhauseffektes, solare Gewinne werden über die Gebäudehülle generiert. Gemäß DIN V 18599 fließen solare Gewinne über opake sowie über transparente Bauteile in die Bilanz eines Gebäudes bzw. einer Zone ein. Die Bilanzierung von solaren Gewinnen über mehrschichtige, solare Gewinne generierende Bauteile wie Luftkollektoren, ist bislang nicht möglich. In diesem Kapitel wird daher ein Bilanzierungsansatz für Luftkollektoren auf Basis der DIN EN ISO 13790 (DIN EN ISO 13790 2008) und Richtlinie des Fachverbandes Transparente Wärmedämmung e.V. (Werner J. Platzer 2000) beschrieben, der mit der Bilanzierung des Heizbedarfs und Kühlbedarfs nach DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011) harmonisiert.

Es wird vorgeschlagen, die solaren Gewinne durch Luftkollektorkonstruktionen innerhalb der solaren Gewinne als separaten Term zu addieren. Die ergänzte Berechnungsformel stellt sich wie folgt dar:

$$Q_S = \sum Q_{S,tr} + \sum Q_{S,opak} + \sum Q_{S,kol} \quad 4.1$$

mit: Q_S	die Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung
$Q_{S,tr}$	die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung durch transparente Bauteile
$Q_{S,opak}$	die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung auf opake Flächen
$Q_{S,kol}$	die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung auf Kollektorfläche

Luftkollektoren übertragen Wärme überwiegend durch Transmission, durch Konvektion oder mit Hilfe an den Luftspalt thermisch angeschlossener Gebäudetechnik. Daher ist die differenzierte Bilanzierung gemäß der vorherrschenden Wärmeübertragungsart notwendig.

4.1 Wärmeeinträge durch Luftkollektor durch Konduktion

Der Konduktionsluftkollektor ist ein Bauteil mit drei verschiedenen Schichten: einer transparenten Schicht, einer Luftschicht und einer opaken Schicht (siehe Abb. 4-1). Die im Luftkollektor erzeugte Wärme wird bei dieser Art des Kollektors durch Wärmeleitung durch die opake Schicht hindurch zum beheizten Raum geleitet. Konduktionsluftkollektoren können zwei verschiedene Schichtfolgen aufweisen: transparente Deckschicht, Luftschicht und opake Wandschicht oder opake Deckschicht, Luftschicht und opake Wandschicht.

4.1.1 Konduktionsluftkollektor mit transparenter Außenschicht

Bei Luftkollektoren mit transparenter oder transluzenter Außenschicht kann ein hoher Anteil der auf das Bauteil eintreffenden Solarstrahlung genutzt werden, die Wärmeenergie wird durch Transmission (Konduktion) durch das opake Bauteil hindurch an den Innenraum übertragen (siehe Abb. 4.1).

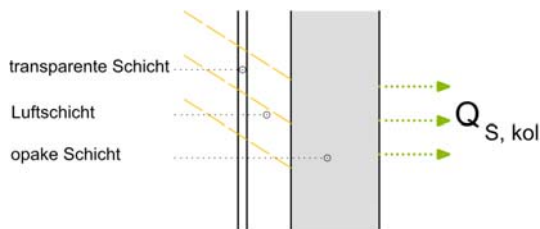


Abb. 4-1: Konduktionsluftkollektor mit transparente Außenschicht (Eigene Darstellung, Grundlage: (Tersluisen, Bauer, Nasrollahi November 2015))

Prinzipiell und vereinfacht betrachtet setzt sich die Bilanz der solaren Einträge eines Konduktions-Luftkollektors wie folgt zusammen:

$$\text{Wärmeeintrag} = \left(\text{Strahlung} \star \text{Abminderungsfaktoren} \star \text{Kollektorfläche} \star \left(\text{Gesamtenergiedurchlassgrad} \star \text{Absorptionsgrad} \star \text{Verhältnis der Wärmewiderstände} - \text{Abstrahlungsverluste} \right) \star \text{Zeit} \right)$$

Zu den Abminderungsfaktoren gehören die Abminderung durch Verschmutzung der transparenten Schicht, deren Verschattung, des Rahmenanteils usw. Da sich der Gesamtenergiedurchlass einer transparenten Schicht in der Regel auf senkrecht eintreffende Strahlung bezieht, muss der g-Wert auf schräg einfallende Strahlung umgerechnet werden. Der Absorptionsgrad der Oberfläche der opaken Bauteilschicht gibt an, wie viel der im Luftspalt auf die Oberfläche auftreffenden Solarstrahlung schlussendlich absorbiert werden kann. Die Wärmeenergie, die im Luftspalt entsteht, wird, abhängig von den Widerständen nach außen sowie nach innen hin, durch das opake Bauteil hindurch an den Innenraum weitergeleitet. Abgezogen werden muss schlussendlich noch der Anteil eines Strahlungsverlustes.

Detailliert berechnet bedeutet dies für den Wärmeeintrag durch Transmission folgende Gleichung:

$$Q_{S, kol} = \left((I_S F_{sh, ob, k} F_{sh} F_W F_S) (F_F A_{kol}) g_{\alpha} \left(\frac{U_{kol}}{U_{kol, tr, e}} \right) - (F_{r, k} \Phi_{r, k}) \right) t \quad 4.2$$

mit: $Q_{S, kol}$ die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung auf die Kollektorfläche
 I_S die mittlere solare Einstrahlung während eines Monats nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)

$F_{sh,ob,k}$	der Verschattungsfaktor durch außen liegende Hindernisse für die Kollektorfläche
F_{sh}	der Verschattungsfaktor innerhalb der Kollektorkonstruktion
F_W	Abminderungsfaktor wegen des nicht senkrechten Strahlungseinfalls; $FW=0,9$ (DIN V 18599-2 2011)
F_S	Abminderungsfaktor infolge von Verschmutzung nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
F_F	Abminderungsfaktor für Rahmen
A_{kol}	die Gesamtfläche des Kollektors
g	Absorptionskoeffizient der Oberfläche, die die Sonnenstrahlung aufnimmt
α	Absorptionsgrad des opaken Bauteils vom Kollektor
U_{kol}	Wärmedurchgangskoeffizient des Kollektors zwischen Innenraum und Außenumgebung
$U_{kol,tr,e}$	Wärmedurchgangskoeffizient der transparenten Schicht des Kollektors
$F_{r,k}$	der Formfaktor zwischen dem Kollektor und dem Himmel: $F_{r,k} = 1$ für waagerechte Bauteile bis 45° Neigung; $F_{r,k} = 0,5$ für senkrechte Bauteile größer 45° Neigung
$\Phi_{r,k}$	der zusätzliche Wärmestrom aufgrund der von Bauteil k ausgehenden Wärmestrahlung an den Himmel, bestimmt nach Formel 4.3
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

Durch Abstrahlung gibt es immer Verluste in Richtung Himmel. Die Abstrahlungsverluste des Kollektors werden wie die Abstrahlungsverluste opaker Bauteile berechnet. Der Abstrahlungswärmestrom des Kollektors zum Himmel ist gemäß folgender Gleichung zu berechnen.

$$\Phi_r = R_{se} U_{kol} A_{kol} h_r \Delta\theta_{er} \quad 4.3$$

mit:	Φ_r	Der Wärmestrom aufgrund der von Bauteil ausgehenden Wärmestrahlung an den Himmel
	R_{se}	der Wärmeübergangswiderstand an der Außenoberfläche des Bauteils, bestimmt nach ISO 6946 (DIN EN ISO 6946 2008)
	U_{kol}	der Wärmedurchgangskoeffizient des Kollektors, bestimmt nach ISO 6946 (DIN EN ISO 6946 2008)
	A_{kol}	die Projektionsfläche des Kollektors
	h_r	der äußere Strahlungswärmetransferkoeffizient, bestimmt nach ISO 6946 (DIN EN ISO 6946 2008)

$\Delta\theta_{er}$

die mittlere Differenz zwischen der Außenlufttemperatur und der scheinbaren Temperatur des Himmels, vereinfachend kann 10 K angenommen werden (DIN V 18599-2 2011)

4.1.2 Konduktionsluftkollektor mit opaker Außenschicht

Eine andere Art Luftkollektor ist der Konduktionsluftkollektor mit opaker Außenschicht, die als dünne, wärmeleitende Absorber Schicht dient. Der sonstige Kollektoraufbau entspricht dem transparenten Konduktionsluftkollektor. (siehe Abb. 4-2).

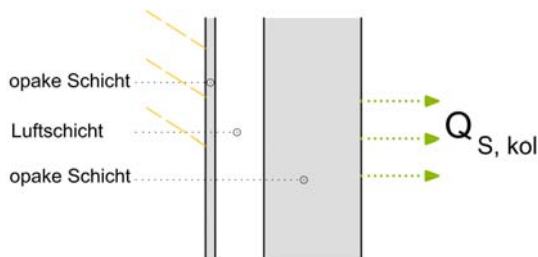


Abb. 4-2: Konduktionsluftkollektor mit opaker Außenschicht (Eigene Darstellung, Grundlage: (Tersluisen, Bauer, Nasrollahi November 2015))

Der solare Wärmeeintrag durch dieses Bauteil wird ähnlich denen einer opaken Wand nach folgender Formel berechnet.

$$Q_{S, kol} = \left((I_S F_{sh, ob, k}) A_{kol} \alpha (R_{se} U_{kol}) - (F_{r, k} \Phi_{r, k}) \right) t \quad 4.4$$

mit:	$Q_{S, kol}$	die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung auf Kollektorfläche
	I_S	die mittlere solare Einstrahlung während eines Monats nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	$F_{sh, ob, k}$	der Verschattungsfaktor durch außen liegende Hindernisse für die Kollektorfläche
	A_{kol}	die Gesamtfläche des Kollektors in einer Orientierung
	α	Absorptionskoeffizient der Oberfläche, die die Sonnenstrahlung aufnimmt nach DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011)
	R_{se}	der äußere Wärmeübergangswiderstand
	U_{kol}	Wärmedurchgangskoeffizient des Kollektors zwischen Innenraum und Außenumgebung
	$F_{r, k}$	der Formfaktor zwischen dem Bauteil und dem Himmel: $F_f = 1$ für waagerechte Bauteile bis 45° Neigung; $F_f = 0,5$ für senkrechte Bauteile größer 45° Neigung
	$\Phi_{r, k}$	der zusätzliche Wärmestrom aufgrund der von Bauteil k ausgehenden Wärmestrahlung an den Himmel, bestimmt nach Formel 4.3

t die Dauer des Berechnungszeitraums

$c_{p,a}$ kann $0,34 \text{ [Wh/m}^3 \cdot \text{K]}$ gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011)

4.2 Wärmeeinträge durch Konvektionsluftkollektor

Die konvektiven Luftkollektoren nutzen die Luft in der Luftschicht als Wärmetragmedium. Mit dieser Methode wird die absorbierte Wärme durch Luft direkt zur beheizten Zone transportiert, die Nutzbarkeit ist im Vergleich zum Konduktionskollektor erhöht.

4.2.1 Konvektionsluftkollektor mit Luftaustausch mit der Raumluft

Diese Art von konvektiven Kollektoren weist einen direkten Luftaustausch mit der zu beheizenden Zone auf. Die beinhaltenete Wärme wird durch die Kollektorluft zum Innenluft transportiert. Auch bei dieser Art von Kollektor kann die Außenschicht transparent oder auch opak sein.

$$\text{Wärmeeintrag} = \left(\text{Strahlung} \star \text{Abminderungsfaktoren} \star \text{Kollektorfläche} \star \text{Gesamtenergiedurchlassgrad} \star \text{Absorptionsgrad} \star \left(\text{Verhältnis der Wärmewiderstände} + \text{zusätzlicher Wärmetransferkoeffizient durch Konvektion} \right) - \text{Abstrahlungsverluste} \right) \star \text{Zeit}$$

4.2.1.1 Konvektionsluftkollektor mit transparenter Außenschicht

Gemäß unterer Abbildung wird die Wärmeenergie durch die Luft des Luftspaltes in den zu beheizenden Raum eingebracht. Die erwärmte Kollektorluft strömt solange in den Raum, solange sie wärmer als Innenluft ist, die Innenraumluft strömt, um die Bilanz auszugleichen, zurück in den Luftspalt und wird wieder erwärmt. Mit diesem Prinzip wird der Raum durch den konvektiven Luftkollektor beheizt.

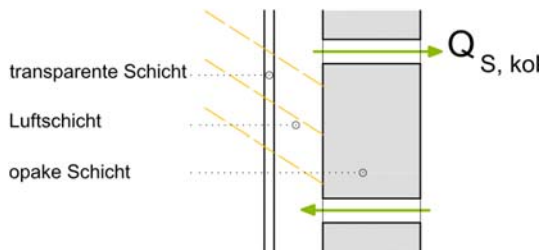


Abb. 4-3: Konvektionsluftkollektor mit transparenter Außenschicht (Eigene Darstellung, Grundlage: (Tersluisen, Bauer, Nasrollahi November 2015))

Nach unterer Gleichung ist die abgegebene Wärme durch den konvektiven Luftkollektor mit transparenter Außenschicht zum Raum zu berechnen.

$$Q_{S,kol} = \left((I_S F_{sh,ob,k} F_{sh} F_W F_S) (F_F A_{kol}) g \alpha \left((U_{kol} R_{tr,e}) + \left(\frac{U_{kol}^2 R_{kol,i}}{U_{kol,i} U_{kol,e}} \rho_a c_a \frac{q_{kol}}{A_{kol}} \kappa_{kol} \omega \right) \right) - (F_{r,k} \Phi_{r,k}) \right) t \quad 4.5$$

mit:	$Q_{S,kol}$	die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung auf die Kollektorfläche
	I_S	die mittlere solare Einstrahlung während eines Monats nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	$F_{sh,ob,k}$	der Verschattungsfaktor durch außen liegende Hindernisse für die Kollektorfläche
	F_{sh}	der Verschattungsfaktor innerhalb der Kollektorkonstruktion
	F_W	Abminderungsfaktor wegen des nicht senkrechten Strahlungseinfalls; $F_W=0,9$ (DIN V 18599-2 2011)
	F_S	Abminderungsfaktor infolge von Verschmutzung nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	F_F	Abminderungsfaktor für Rahmen
	A_{kol}	die Gesamtfläche des Kollektors
	g	solarer Gesamtenergiedurchlassgrad der transparenten Schicht nach DIN EN 410 (DIN EN 410 2011a)
	α	Absorptionskoeffizient der Oberfläche, die die Sonnenstrahlung aufnimmt
	U_{kol}	Wärmedurchgangskoeffizient des Kollektors zwischen Innenraum und Außenumgebung
	$U_{kol,i}$	innerer Wärmedurchgangskoeffizient (die Widerstand von Hälfte der Luftschicht wird berücksichtigt)
	$U_{kol,e}$	äußerer Wärmedurchgangskoeffizient (die Widerstand von Hälfte der Luftschicht wird berücksichtigt)
	$R_{tr,e}$	äußerer Wärmedurchlasswiderstand des Kollektors zwischen Luftspalt und Außenumgebung
	$R_{kol,i}$	innerer Wärmedurchlasswiderstand der opaken Schicht zwischen Luftspalt und Innenraum
	$\rho_a c_a$	die volumenbezogene Wärmespeicherefähigkeit der Luft
	q_{kol}	der Sollwert des Luftvolumenstroms durch den belüfteten Spalt des Kollektors
	κ_{kol}	ein Faktor, bezogen auf das Verhältnis der konvektiven Wärmegewinne zur Wärmeverluste von Konvektionsluftkollektoren nach Formel 4.6
	ω	das Verhältnis der Gesamtsonnenstrahlung auf den Kollektor bei offenem Luftspalt zur Gesamtsonnenstrahlung über den gesamten Berechnungsschritt, bestimmt nach Formel 4.8

$F_{r,k}$	der Formfaktor zwischen dem Kollektor und dem Himmel: $F_f = 1$ für waagerechte Kollektor bis 45° Neigung; $F_f = 0,5$ für senkrechte Kollektor größer 45° Neigung
$\Phi_{r,k}$	der zusätzliche Wärmestrom aufgrund der von Bauteil k ausgehenden Wärmestrahlung an den Himmel, bestimmt nach Formel 4.3
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

$\rho_a c_a$ kann 0,34 [Wh/m³·K] gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011)

κ_{sw} ist ein Parameter und wird wie folgt festgelegt.

$$\kappa_{kol} = \left(1 - \exp \left(\frac{-A_{kol} Z}{\rho_a c_a q_{kol}} \right) \right) \quad 4.6$$

mit: A_{kol}	Gesamtfläche des Kollektors
Z	Ein Parameter nach Formel 4.7
$\rho_a c_a$	die volumenbezogene Wärmespeicherefähigkeit der Luft
q_{kol}	der Sollwert des Luftvolumenstroms durch den belüfteten Spalt des Kollektors

Dabei ist Z ein Parameter, die liegt nach folgt fest:

$$\frac{1}{Z} = \frac{h_r}{h_c (h_c + 2h_r)} + \frac{1}{U_{kol,i} + U_{kol,e}} \quad 4.7$$

mit: h_c	der Wärmetransferkoeffizient durch Konvektion im Luftspalt nach DIN EN ISO 6946 (DIN EN ISO 6946 2008)
h_r	der Wärmetransferkoeffizient durch Strahlung im Luftspalt DIN EN ISO 6946 (DIN EN ISO 6946 2008)
$U_{kol,i}$	der innere Wärmedurchgangskoeffizient (die Widerstand von Hälfte der Luftschicht wird berücksichtigt)
$U_{kol,e}$	der äußere Wärmedurchgangskoeffizient (die Widerstand von Hälfte der Luftschicht wird berücksichtigt)

Der Verhältniswert ω wird wie folgt berechnet.

$$\omega = 1 - \exp \left(\frac{-2,2 I_{S,kol}}{U_{kol,e} (\theta_{kol,in} - \theta_e) t} \right) \quad 4.8$$

mit: ω	das Verhältnis der Gesamtsonnenstrahlung auf das Bauteil bei offenem Luftspalt zur Gesamtsonnenstrahlung über den Bilanzierungszeitraum
$I_{S,kol}$	Die gesamte Solare Einstrahlung auf der Kollektorfläche über den Bilanzierungszeitraum
$U_{kol,e}$	der äußere Wärmedurchgangskoeffizient (die Widerstand von Hälfte der Luftschicht wird berücksichtigt)
$\theta_{kol,in}$	die durchschnittliche Luftschichttemperatur des Kollektors über den gesamten Berechnungsschritt
θ_e	die durchschnittliche Außentemperatur über den Bilanzierungszeitraum
t	die Dauer des Bilanzierungszeitraums

4.2.1.2 Konvektionsluftkollektor mit opaker Außenschicht

In dieser Art von Kollektor ist die Außenschicht eine opake Absorberschicht (siehe Abb. 4-4). Die Funktionsweise entspricht grundlegend dem Konvektionskollektor mit transparenter Schicht, mit der Ausnahme, dass die Absorption auf der außenluftzugewandten Kollektoroberfläche stattfindet und die Wärme konduktiv in den Luftspalt gelangt.

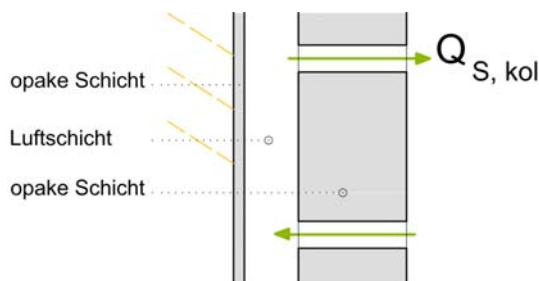


Abb. 4-4: Konvektionsluftkollektor mit opaken Außenschicht (Eigene Darstellung, Grundlage: (Tersluisen, Bauer, Nasrollahi November 2015))

Die solare Wärmegewinne durch sogenannte Kollektor wird nach folgt bilanziert.

$$Q_{S,kol} = \left((I_S F_{sh,ob,k} F_{sh}) (F_F A_{kol}) \alpha \left(\left(\frac{U_{kol}}{h_e} \right) + \left(\frac{U_{kol}^2}{U_{kol,i}^2 h_e} \rho_a c_a \frac{q_{kol}}{A_{kol}} \kappa_{kol} \omega \right) \right) - F_{r,k} \Phi_{r,k} \right) t \quad 4.9$$

mit: $Q_{S,kol}$	die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung auf Kollektorfläche
I_S	die mittlere solare Einstrahlung während eines Monats nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)

$F_{sh,ob,k}$	der Verschattungsfaktor durch außen liegende Hindernisse für die Kollektorfläche
F_{sh}	der Verschattungsfaktor innerhalb der Kollektorkonstruktion
F_F	Abminderungsfaktor für Rahmen
A_{kol}	Gesamtfläche des Kollektors
α	Absorptionskoeffizient der Oberfläche, die die Sonnenstrahlung aufnimmt
U_{kol}	Wärmedurchgangskoeffizient des Kollektors zwischen Innenraum und Außenumgebung
$U_{kol,i}$	der innere und Wärmedurchgangskoeffizient (die Widerstand von Hälfte der Luftschicht wird berücksichtigt)
h_e	Wärmetransferkoeffizient an der Außenfläche nach ISO 6946 (DIN EN ISO 6946 2008)
$\rho_a c_a$	die volumenbezogene Wärmespeicherfähigkeit der Luft
q_{kol}	der Sollwert des Luftvolumenstroms durch den belüfteten Spalt des Kollektors
κ_{kol}	ein Faktor, bezogen auf das Verhältnis der konvektiven Wärmegevinne zur Wärmeverluste von Konvektionsluftkollektoren nach Formel 4.6
ω	das Verhältnis der Gesamtsonnenstrahlung auf den Kollektor bei offenem Luftspalt zur Gesamtsonnenstrahlung über den gesamten Berechnungsschritt, bestimmt nach Formel 4.8
$F_{r,k}$	der Formfaktor zwischen dem Bauteil und dem Himmel: $F_{r,k} = 1$ für waagerechte Bauteile bis 45° Neigung; $F_{r,k} = 0,5$ für senkrechte Bauteile größer 45° Neigung
$\Phi_{r,k}$	der zusätzliche Wärmestrom aufgrund der von Bauteil k der zusätzliche Wärmestrom aufgrund der vom Kollektor ausgehenden Wärmestrahlung an den Himmel, bestimmt nach Formel 4.3
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

$c_{p,a}$ kann 0,34 [Wh/m³·K] gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011)

4.2.2 Konvektionsluftkollektor mit Zuluft aus der Außenluft

Bei dieser Art von Kollektor strömt Außenluft in den Kollektor, wird durch die Sonneneinstrahlung erwärmt und strömt in die zu beheizende Zone. Ein Teil von der benötigten frischen Luft des Raumes kann mit diesem Prinzip vorerwärmt werden, die Lüftungsbilanz der Zone muss ausgeglichen werden.

4.2.2.1 Außenluft-Konvektionsluftkollektor mit transparenter Außenschicht

Dieser Luftkollektor weist eine transparente Deckschicht auf. Die Solarstrahlung wird auf der opaken Wandschicht absorbiert und erwärmt so die einströmende Außenluft. Die erwärmte Luft wird als direkte Zuluft für den zu heizenden Raum genutzt.

Die Bilanzierung des Wärmeeintrags durch diesen Kollektor ist gemäß unterer Gleichung zu rechnen.

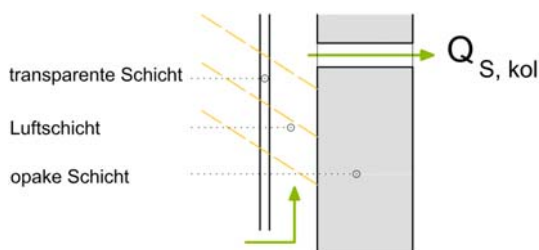


Abb. 4-5: Konvektionsluftkollektor mit Luftaustausch mit der Außenluft mit transparenter Außenschicht (Eigene Darstellung, Grundlage: (Tersluisen, Bauer, Nasrollahi November 2015))

Wärmeeintrag	=	(Strahlung	*	Abminderungsfaktoren	*	Kollektorfläche	*	Gesamtenergiedurchlassgrad	*	Absorptionsgrad	*	(Verhältnis der Wärmewiderstände	+	zusätzlicher Wärmetransferkoeffizient durch Konvektion)	-	Abstrahlungsverluste)	*	Zeit
--------------	---	---	-----------	---	----------------------	---	-----------------	---	----------------------------	---	-----------------	---	---	---------------------------------	---	--	---	---	----------------------	---	---	------

Die Bilanzierung des Wärmeeintrags durch diesen Kollektor ist gemäß unterer Gleichung zu rechnen.

$$Q_{S, kol} = \left((I_S F_{sh, ob, k} F_{sh} F_W F_S) (F_F A_{kol}) g \alpha \left(U_{kol} R_{tr, e} + \frac{U_{kol}^2 R_{kol, i}}{U_{kol, i} U_{kol, e}} \rho_a c_a \frac{q_{kol}}{A_{kol}} \kappa_{kol} \right) - F_{r, k} \Phi_{r, k} \right) 4.10$$

- mit:
- $Q_{S, kol}$ die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung auf die Kollektorfläche
 - I_S die mittlere solare Einstrahlung während eines Monats nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
 - $F_{sh, ob, k}$ der Verschattungsfaktor durch außen liegende Hindernisse für die Kollektorfläche
 - F_{sh} der Verschattungsfaktor innerhalb der Kollektorkonstruktion
 - F_W Abminderungsfaktor wegen des nicht senkrechten Strahlungseinfalls; $F_W=0,9$ (DIN V 18599-2 2011)

F_S	Abminderungsfaktor infolge von Verschmutzung nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
F_F	Abminderungsfaktor für Rahmen
A_{kol}	die Gesamtfläche des Kollektors
g	solarer Gesamtenergiedurchlassgrad der transparenten Schicht nach DIN EN 410 (DIN EN 410 2011a)
α	Absorptionskoeffizient der Oberfläche, die die Sonnenstrahlung aufnimmt
U_{kol}	Wärmedurchgangskoeffizient des Kollektors zwischen Innenraum und Außenumgebung
$U_{kol,i}$	innerer Wärmedurchgangskoeffizient (die Widerstand von Hälfte der Luftschicht wird berücksichtigt)
$U_{kol,e}$	äußerer Wärmedurchgangskoeffizient (die Widerstand von Hälfte der Luftschicht wird berücksichtigt)
$R_{kol,i}$	innerer Wärmedurchlasswiderstand der Wand zwischen Luftspalt und Innenraum
$R_{tr,e}$	äußerer Wärmedurchlasswiderstand der transparenten Schicht zwischen Luftspalt und Außenumgebung
$\rho_a c_a$	die volumenbezogene Wärmespeicherefähigkeit der Luft
q_{kol}	der Sollwert des Luftvolumenstroms durch den belüfteten Spalt des Kollektors
κ_{kol}	ein Faktor, bezogen auf das Verhältnis der konvektiven Wärmegewinne zur Wärmeverluste von Konvektionsluftkollektoren nach Formel 4.6
$F_{r,k}$	der Formfaktor zwischen dem Kollektor und dem Himmel: $F_f = 1$ für waagerechte Kollektor bis 45° Neigung; $F_f = 0,5$ für senkrechte Kollektor größer 45° Neigung
$\Phi_{r,k}$	der zusätzliche Wärmestrom aufgrund der vom Kollektor ausgehenden Wärmestrahlung an den Himmel, bestimmt nach Formel 4.3
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

$\rho_a c_a$ kann 0,34 [Wh/m³·K] gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011)

4.2.2.2 Außenluft-Konvektionsluftkollektor mit opaker Außenschicht

Die Außenschicht dieses Kollektors ist eine opake Absorberschicht. Die Außenschicht absorbiert die solare Strahlung und leitet die erzeugte Wärme nach innen Richtung Luftschicht. Die Wärme wird auf die einströmende Außenluft übertragen und an den zu heizenden Innenraum konvektiv weitergegeben. Der opake Außenluft-Konvektionskollektor erbringt geringere Gewinne als der transparente Kollektor gleicher Bauart.

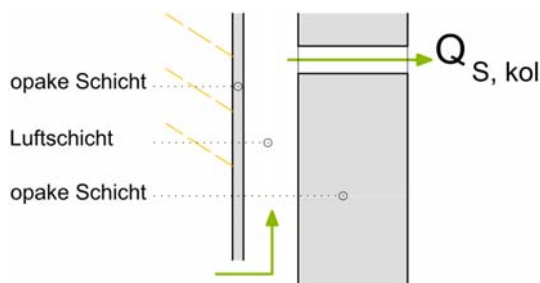


Abb. 4-6: Konvektionsluftkollektor mit Luftaustausch mit der Außenluft mit transparenter Außenschicht (Eigene Darstellung, Grundlage: (Tersluisen, Bauer, Nasrollahi November 2015))

Die Wärme, die durch diesen Kollektor auf den zu beheizenden Raum übertragen wird, wird wie folgt bilanziert.

$$Q_{S, kol} = \left((I_S F_{sh, ob, k} F_{sh}) (F_F A_{kol}) \alpha \left(\frac{U_{kol}}{h_e} + \frac{U_{kol}^2}{U_{kol, i}^2 h_e} \rho_a c_a \frac{q_{kol}}{A_{kol}} \kappa_{kol} \right) - F_{r, k} \Phi_{r, k} \right) t \quad 4.11$$

mit: $Q_{S, kol}$	die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung auf die Kollektorfläche
I_S	die mittlere solare Einstrahlung während eines Monats nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
$F_{sh, ob, k}$	der Verschattungsfaktor durch außen liegende Hindernisse für die Kollektorfläche
F_{sh}	der Verschattungsfaktor innerhalb der Kollektorkonstruktion
F_F	Abminderungsfaktor für Rahmen
A_{kol}	die Gesamtfläche des Kollektors
α	Absorptionskoeffizient der Oberfläche, die die Sonnenstrahlung aufnimmt
U_{kol}	Wärmedurchgangskoeffizient des Kollektors zwischen Innenraum und Außenumgebung
$U_{kol, i}$	innerer Wärmedurchgangskoeffizient (die Widerstand von Hälfte der Luftschicht wird berücksichtigt)
$U_{kol, e}$	äußerer Wärmedurchgangskoeffizient (die Widerstand von Hälfte der Luftschicht wird berücksichtigt)
h_e	Wärmetransferkoeffizient an der Außenfläche nach ISO 6946 (DIN EN ISO 6946 2008)
$\rho_a c_a$	die volumenbezogene Wärmespeicherefähigkeit der Luft

q_{kol}	der Sollwert des Luftvolumenstroms durch den belüfteten Spalt des Kollektors
κ_{kol}	ein Faktor, bezogen auf das Verhältnis der konvektiven Wärmegevinne zur Wärmeverluste von Konvektionsluftkollektoren nach Formel 4.6
$F_{r,k}$	der Formfaktor zwischen dem Kollektor und dem Himmel: $F_f = 1$ für waagerechte Kollektor bis 45° Neigung; $F_f = 0,5$ für senkrechte Kollektor größer 45° Neigung
$\Phi_{r,k}$	der zusätzliche Wärmestrom aufgrund der vom Kollektor ausgehenden Wärmestrahlung an den Himmel, bestimmt nach Formel 4.3
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

$C_{p,a}$ kann $0,34 \text{ [Wh/m}^3\cdot\text{K]}$ gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011)

4.3 Luftkollektor gekoppelt an TGA-Anlage

Wärme, die durch Luftkollektoren erzeugt wird, kann in das technische Gebäudekonzept eingebunden und dem konventionellen Heizsystem zugeführt werden. Die Kopplung an eine TGA-Anlage wie eine Wärmepumpe ist notwendig. Zur Bilanzierung dieser Art von Kollektornutzung wird die Berechnung der mittleren Lufttemperatur des Luftkollektors als Primär-Temperatur der Wärmequelle von Wärmepumpe notwendig. Danach wird die erzeugte Wärme durch Wärmepumpe gemäß DIN EN 14511-2 (DIN EN 14511-2 2015) und DIN 16147 (DIN EN 16147 2015) bilanzierbar. Die Bilanzierung dieser Kollektortypen ist auch per thermisch-dynamische Simulation möglich.

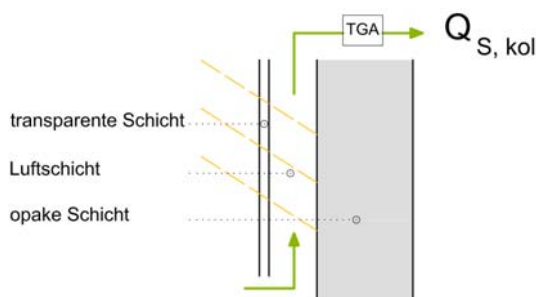


Abb. 4-7: Luftkollektor mit transparenter Außenschicht, gekoppelt an TGA-Anlage (Eigene Darstellung, Grundlage: (Tersluisen, Bauer, Nasrollahi November 2015))

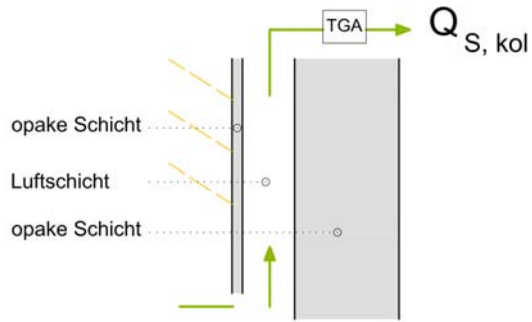


Abb. 4-8: Luftkollektor mit opaker Außenschicht, gekoppelt an TGA-Anlage (Eigene Darstellung, Grundlage: (Tersluisen, Bauer, Nasrollahi November 2015))

5 Berechnung des Kühlenergiebedarfs einer Zone nach DIN V 18599-2

Der Kühlbedarf einer Gebäudezone nach DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011) wird wie der Heizwärmebedarf monatweise berechnet. Die Abb. 5-1 zeigt das Prinzip der Bilanzierung des Heizwärme- und Kühlbedarfs einer Gebäudezone.

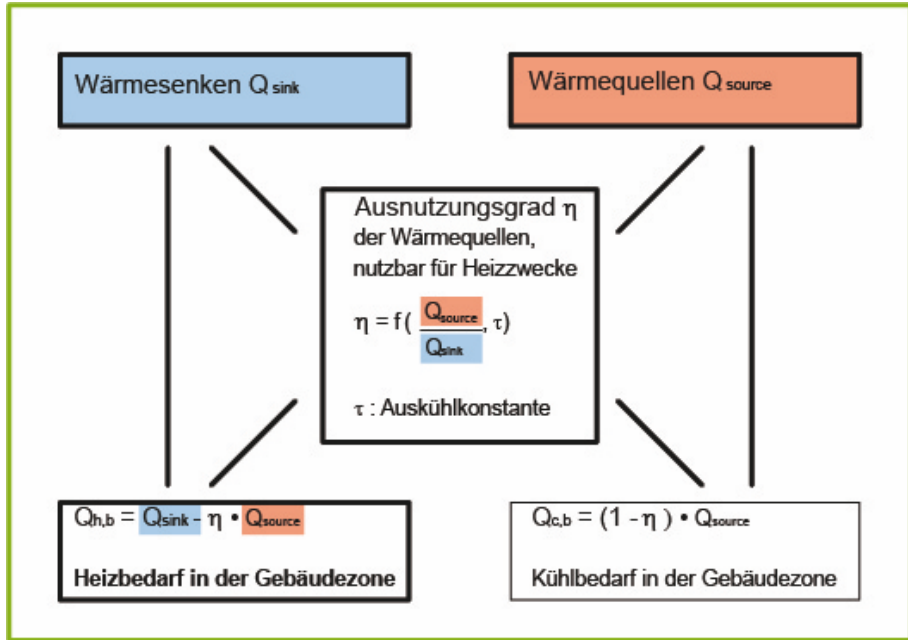


Abb. 5-1: Berechnungsprinzip des Heiz- und Kühlbedarfs einer Gebäudezone (DIN V 18599-2 2011)

Zur Bilanzierung des Kühlbedarfs eines Wohngebäudes ist der Wert „Wärmequelle“ direkt entscheidend. Die Wärmesenken beeinflussen vielmehr den Ausnutzungsgrad der Wärmequellen. In diesem Kapitel werden die Wärmesenken, die nicht für eine übliche Gebäudezone entscheidend sind, vernachlässigt. Es gilt:

$$Q_{c,b} = (1 - \eta) Q_{\text{source}} \quad 5.1$$

mit: $Q_{c,b}$ der Kühlbedarf einer Gebäudezone

η der monatliche Ausnutzungsgrad der Wärmequellen

Q_{source} die Summe der Wärmequellen in der Gebäudezone unter den jeweiligen Randbedingungen

5.1 Wärmesenken Q_{sink}

Die Wärmesenken beziffern die Wärmeverluste der Zone durch Transmission, Lüftung, Kälteeinträge von Lüftungsanlagen, internen Kältequellen und Abstrahlung.

$$Q_{\text{sink}} = \sum Q_T + \sum Q_V + \sum Q_S \quad 5.2$$

mit: Q_{sink} die gesamte Wärmesenken einer Gebäudezone

Q_T die Transmissionswärmesenken

Q_V die Lüftungwärmesenken

Q_S die Wärmesenken durch Abstrahlung

5.1.1 Transmissionswärmesenken Q_T

In der Kühlperiode entstehen Transmissionswärmeverluste, wenn die Außenseite eines Bauteils eine geringere Temperatur als die Innenseite aufweist. Für die Innenseite wird die Innensolltemperatur nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011) angenommen.

Es gilt:

$$Q_T = \sum Q_{T,e} + \sum Q_{T,s} \quad 5.3$$

mit: Q_T die Summe der Transmissionswärmesenken

$Q_{T,e}$ die Transmissionswärmesenken durch Außenbauteile

$Q_{T,s}$ die Transmissionswärmesenken zum Erdbreich

5.1.1.1 Transmission durch Außenbauteile

Während der Kühlperiode hat nachts oder in besonderen Tagen die Außenluft eine geringere Temperatur als die Innentemperatur. In dieser Zeit entstehen Wärmeverluste durch die Außenbauteile hindurch. Nach DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011) wird der Kühlbedarf monatweise berechnet. Es gilt:

$$Q_{T,e} = UA(\theta_i - \theta_e)t \quad 5.4$$

mit: U der Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils der Gebäudehülle, berechnet nach DIN EN ISO 6946 (DIN EN ISO 6946 2008) für opake Bauteile oder nach DIN V 4108-4 (DIN 4108-4 2012) für transparente Bauteile

A die Fläche eines Bauteils, das die Gebäudezone zur Außenluft hin begrenzt. Als Maße von Fenstern und Türen werden die lichten inneren Rohbauöffnungen angesetzt

θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
θ_e	die durchschnittliche Außentemperatur des Monats nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

Der Wärmedurchgangskoeffizient mit Berücksichtigung der Wärmebrücke wird nach Teil 3.1.1.1 zu berechnen.

5.1.1.1 Transmission zum Erdreich

Zum Transmissionswärmeverlust im Laufe der Kühlperiode zählen auch die Transmissionswärmesenken zum Erdreich, weil die Erdreichtemperatur in dem Betrachtungszeitraum immer geringer als Innensolltemperatur ist. Es gilt:

$$Q_{T,s} = UA(\theta_i - \theta_e)t \quad 5.5$$

mit:	
U	der Wärmetransferkoeffizient über das Erdreich (H_G nach DIN EN ISO 13370 (DIN EN ISO 13370 2008))
A	die Fläche eines Bauteils auf dem Erdreich
θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
θ_e	die durchschnittliche monatliche Außentemperatur nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

5.1.2 Lüftungswärmesenken Q_v

Im Verlauf der Kühlperiode kommen Lüftungswärmesenken zustande, wenn die Vorlauftemperatur der zum Raum strömenden Luft eine geringere Temperatur als die Innensolltemperatur aufweist. Die Lüftungswärmesenken entstehen durch Luftaustausch wegen der Undichtigkeit, Fensterlüftung und durch maschinelle Lüftung.

$$Q_v = \sum Q_{v,inf} + \sum Q_{v,win} + \sum Q_{v,mech} \quad 5.6$$

mit:	Q_v	die Summe der Lüftungswärmesenken
	$Q_{v,inf}$	die Lüftungswärmesenken durch Infiltration von Außenluft
	$Q_{v,win}$	die Lüftungswärmesenken durch Fensterlüftung
	$Q_{v,mech}$	die Kälteeinträge durch mechanische Lüftungsanlagen

5.1.2.1 Lüftungswärmesenken durch Infiltration von Außenluft

Infolge unkontrollierten Luftaustauschs durch Undichtigkeit einer Zone mit Außenluft entsteht ein Energieaustausch zwischen der Zone und Außen. Wenn die Außentemperatur im Laufe der Kühlperiode geringer als die Innensolltemperatur ist, bringt der Luftaustausch Wärmeverluste mit sich. Es gilt:

$$Q_{V,inf} = n_{inf} V c_{P,a} \rho_a (\theta_i - \theta_e) t \quad 5.7$$

mit:	n_{inf}	der Tagesmittelwert des Infiltrationsluftwechsels
	V	das Nettoraumvolumen
	$c_{P,a}$	die spezifische Wärmekapazität von Luft
	ρ_a	die Dichte von Luft.
	θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	θ_e	die durchschnittliche monatliche Außentemperatur nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	t	die Dauer des Berechnungszeitraums

$c_{P,a}$ kann 0,34 [Wh/m³·K] gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011)

5.1.2.1 Lüftungswärmesenken durch Fensterlüftung

Die Fensterlüftung verursacht Wärmeverluste, wenn die Außenlufttemperatur geringer als die Innensolltemperatur ist. In diesem Fall wird gemäß folgender Gleichung die Wärmesenke durch Fensterlüftung bilanziert.

$$Q_{V,win} = n_{win} V c_{P,a} \rho_a (\theta_i - \theta_e) t \quad 5.8$$

mit:	n_{win}	der Wärmetransferkoeffizient für Fensterlüftung
	V	das Nettoraumvolumen
	$c_{P,a}$	die spezifische Wärmekapazität von Luft
	ρ_a	die Dichte von Luft.
	θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	θ_e	die durchschnittliche monatliche Außentemperatur nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)

t die Dauer des Berechnungszeitraums

5.2 Bilanzierung der Wärmequellen Q_{source}

Um den Kühlbedarf einer Gebäudezone zu bilanzieren spielen die Wärmegewinne eine Rolle. Die Wärmeeinträge einer Gebäudezone bestehen aus Transmissionswärmequellen, Lüftungswärmequellen und die internen Wärmequellen.

$$Q_{\text{source}} = \sum Q_S + \sum Q_T + \sum Q_V + \sum Q_{\text{l,source}} \quad 5.9$$

mit: Q_{source} die Summe der Wärmequellen in der Gebäudezone
 Q_S die Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung
 Q_T die Transmissionswärmequellen
 Q_V die Lüftungswärmequellen
 $Q_{\text{l,source}}$ die internen Wärmequellen in der betrachteten Gebäudezone

5.2.1 Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung

Die solare Einstrahlung wird im Gebäude durch transparente Bauteile nach innen geleitet und durch verschiedene Fläche absorbiert und in Wärme umgewandelt. Darüber hinaus wird die Sonneneinstrahlung durch opake Bauteile absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die umgewandelte Wärme wird teilweise nach innen geleitet. Die solaren Wärmegewinne durch transparente und opake Bauteile sind die Teile der Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung.

$$Q_S = \sum Q_{S,\text{tr}} + \sum Q_{S,\text{opak}} \quad 5.10$$

mit: Q_S die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung
 $Q_{S,\text{tr}}$ die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung durch transparente Bauteile
 $Q_{S,\text{opak}}$ die Summe der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung auf opake Flächen.

5.2.1.1 Wärmequellen durch solare Einstrahlung durch transparente Flächen

Der Wärmeeintrag aufgrund solarer Einstrahlung auf transparente Flächen ist abhängig von der effektiven transparenten Bauteilfläche, vom g-Wert der transparenten Fläche, die Strahlungsintensität, die auf das Bauteil eintrifft und die Dauer der Einstrahlung.

$$Q_{S,tr} = F_f A g_{eff} I_S t \quad 5.11$$

mit:	
F_f	der Abminderungsfaktor für den Rahmenanteil; sofern keine genaueren Werte bekannt sind, wird auf 0,7 gesetzt, für Dachoberlicht- und schlanke Wintergartenkonstruktionen auf 0,9.
A	die Fläche des Bauteils, anzusetzen sind die lichten Rohbaumaße (Bruttofläche)
g_{eff}	der wirksame Gesamtenergiedurchlassgrad nach DIN EN 13363-1 (DIN EN 13363-1 2007) oder DIN EN 13363-2 (DIN EN 13363-2 2005), bei Folien gegebenenfalls nach DIN EN 410 (DIN EN 410 2011b)
I_S	die mittlere solare Einstrahlung während des Monats nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

5.2.1.1 Wärmequellen durch solare Einstrahlung auf opake Fläche

Der solare Wärmeeintrag durch opake Bauteile kann im Laufe der Kühlperiode wegen hoher solarer Strahlungsintensität und vielen Sonnenstunden pro Tag eine größere Relevanz im Vergleich zum Heizfall haben, da der nutzbare Teil der Wärme durch Kühlung abtransportiert werden muss. Die s.g. Solarwärmegewinne werden durch eintreffende Solarstrahlung, Absorptionsgrad des Bauteils, Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils und relevante Verlustfaktoren durch Konvektion und Abstrahlung beeinflusst werden.

$$Q_{S,opak} = R_{se} U A (\alpha I_S - F_f h_r \Delta \theta_{er}) t \quad 5.12$$

mit:	R_{se}	der äußere Wärmeübergangswiderstand
	U	der Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils
	A	die Gesamtfläche des Bauteils in einer Orientierung
	α	der Absorptionskoeffizient des Bauteils für Solarstrahlung nach DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011)
	I_S	die globale Sonneneinstrahlung für die Orientierung der Bauteilfläche nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	F_f	der Formfaktor zwischen dem Bauteil und dem Himmel: $F_f = 1$ für waagerechte Bauteile bis 45° Neigung; $F_f = 0,5$ für senkrechte Bauteile größer 45° Neigung
	h_r	der äußere Abstrahlungskoeffizient nach DIN 6946 (DIN EN ISO 6946 2008)
	$\Delta \theta_{er}$	die mittlere Differenz zwischen der Temperatur der Umgebungsluft und der scheinbaren Temperatur des Himmels; vereinfachend kann 10 K angenommen werden

t die Dauer des Berechnungszeitraums

5.2.2 Transmissionswärmeequellen Q_T

Wenn die Außenseite eines Bauteils eine höhere Temperatur als Innenseite hat, entstehen Transmissionswärmegewinne. Als Innentemperatur wird die Innensolltemperatur gemäß DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011) angenommen.

Die Transmissionswärmeequellen einer Gebäudezone bestehen aus Transmissionswärmeequellen durch Außenbauteile, durch Bauteile zu benachbarten, ungekühlten und angrenzende gekühlte Gebäudezonen.

$$Q_T = \sum Q_{T,e} + \sum Q_{T,u} + \sum Q_{T,z} \quad 5.13$$

mit: Q_T die Summe der Transmissionswärmeequellen

$Q_{T,e}$ die Transmissionswärmeequellen durch Außenbauteile

$Q_{T,u}$ die Transmissionswärmeequellen zu ungekühlte Gebäudezonen oder Vorbauten

$Q_{T,z}$ die Transmissionswärmeequellen zu angrenzenden gekühlte Gebäudezonen

5.2.2.1 Transmission durch Außenbauteile

Während der Kühlperiode hat die Außenluft eine höhere Temperatur als die gekühlte Zone. Der Wärmestrom strömt in dieser Zeit von außen nach innen, die Transmissionswärmegewinne durch das Außenbauteil sind abhängig vom Temperaturgefälle zwischen Innensolltemperatur und der durchschnittlichen monatlichen Außentemperatur und werden wie folgt berechnet.

$$Q_{T,e} = UA(\theta_e - \theta_i)t \quad 5.14$$

mit: U der Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils der Gebäudehülle, berechnet nach DIN EN ISO 6946 (DIN EN ISO 6946 2008) für opake Bauteile oder nach DIN V 4108-4 (DIN 4108-4 2012) für transparente Bauteile

A die Fläche eines Bauteils, das die Gebäudezone zur Außenluft hin begrenzt. Als Maße von Fenstern und Türen werden die lichten inneren Rohbauöffnungen angesetzt

θ_e die durchschnittliche Außentemperatur des Monats nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)

θ_i die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)

t die Dauer des Berechnungszeitraums

5.2.2.1 Transmission von ungekühlten Gebäudezonen oder Vorbauten

Wenn im Kühlfall der Temperaturunterschied zwischen Innensolltemperatur und ungekühlter benachbarter Zone mehr als 4°C beträgt, wird der transmissionswärmeeintrag durch die gemeinsame Wand wie folgt berechnet (DIN V 18599-2 2011).

$$Q_{T,u} = UA(\theta_u - \theta_i)t \quad 5.15$$

mit:

U	der Transmissionswärmeflusskoeffizient zwischen beheizten und unbeheizten Zonen nach DIN EN ISO 13789 (DIN EN ISO 13789 2008)
A	die Fläche eines Bauteils zwischen der betrachteten Gebäudezone und dem unbeheizten Bereich
θ_u	die mittlere Temperatur der ungekühlte Gebäudezone
θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

5.2.2.1 Transmission von angrenzenden gekühlte Gebäudezonen

Transmissionswärmegewinne von angrenzend gekühlte Gebäudezone wird ab 4°C Temperaturunterschied mit gekühlte Gebäudezone berücksichtigt (DIN V 18599-2 2011).

$$Q_{T,z} = UA(\theta_z - \theta_i)t \quad 5.16$$

mit:

U	der Transmissionswärmeflusskoeffizient zwischen beheizten und unbeheizten nach DIN EN ISO 13789 (DIN EN ISO 13789 2008)
A	die Fläche eines Bauteils zwischen den Gebäudezonen
θ_z	die Bilanz-Innentemperatur der angrenzenden Gebäudezone
θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

5.2.3 Lüftungswärmequellen Q_V

Lüftungswärmequellen treten während der Kühlperiode normalerweise durch Infiltration oder Fensterlüftung auf. Die Lüftungswärmequellen haben noch zwei Teile

wie die mechanische Lüftung (mechanische Heizung im Kühlfall), die in Wohngebäuden nicht vorkommen. Darüber hinaus gibt es auch die Lüftungswärmequellen durch Luftaustausch mit angrenzenden gekühlten oder ungekühlten Zone, die selten im Wohngebäude vorkommen. Die Lüftungswärmequellen durch Luftaustausch mit angrenzenden gekühlten oder ungekühlten Gebäuden müssen bilanziert werden, wenn der Temperaturunterschied zwischen beiden Zonen höher als 4°C ist (DIN V 18599-2 2011).

$$Q_V = \sum Q_{V,inf} + \sum Q_{V,win} + \sum Q_{V,mech} + \sum Q_{V,z} \quad 5.17$$

mit:	Q_V	die Summe der Lüftungswärmequellen
	$Q_{V,inf}$	die Lüftungswärmequellen durch Infiltration von Außenluft
	$Q_{V,win}$	die Lüftungswärmequellen durch Fensterlüftung
	$Q_{V,mech}$	die Lüftungswärmequellen durch mechanische Lüftungsanlagen
	$Q_{V,z}$	die Lüftungswärmequellen durch Luftaustausch von/zu anderen Zonen

5.2.3.1 Lüftungswärmequellen durch Infiltration von Außenluft

Während der Kühlperiode ist die Außenlufttemperatur meist höher als die Innensolltemperatur. Deswegen bringt der Luftaustausch mit Außen Wärmegewinne mit sich. Ein Teil von dieses Luftaustauschs tritt wegen der Undichtigkeit der Gebäude auf. Diese Lüftungswärmequelle durch Infiltration ist nach unterer Gleichung zu bilanzieren.

$$Q_{V,inf} = n_{inf} V c_{P,a} \rho_a (\theta_e - \theta_i) t \quad 5.18$$

mit:	n_{inf}	der Tagesmittelwert des Infiltrationsluftwechsels
	V	das Nettoraumvolumen
	$c_{P,a}$	die spezifische Wärmekapazität von Luft
	ρ_a	die Dichte von Luft.
	θ_e	die durchschnittliche monatliche Außentemperatur nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	t	die Dauer des Berechnungszeitraums

$c_{P,a} \rho_a$ kann 0,34 [Wh/m³·K] gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011)

5.2.3.2 Lüftungswärmequellen durch Fensterlüftung

Lüftungswärmequelle durch Fenster entsteht, wenn die Außenluft wärmer als Raumluft ist. Im Kühlfall hat am meisten die Außenluft höhere Temperatur als Innenluft. Das ist aber nach folgende Gleichung zu bilanzieren.

$$Q_{V,win} = n_{win} V c_{P,a} \rho_a (\theta_e - \theta_i) t \quad 5.19$$

mit:	n_{win}	der Tagesmittelwert des Infiltrationsluftwechsels
	V	das Nettoraumvolumen
	$c_{P,a}$	die spezifische Wärmekapazität von Luft
	ρ_a	die Dichte von Luft.
	θ_e	die durchschnittliche monatliche Außentemperatur nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
	t	die Dauer des Berechnungszeitraums

$c_{P,a} \rho_a$ kann 0,34 [Wh/m³·K] gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011).

5.2.3.3 Wärmeeinträge durch mechanische Lüftungsanlagen

Wenn eine Gebäudezone im Laufe der Kühlperiode durch eine mechanische Lüftungsanlage belüftet wird, entstehen durch die Anlage Wärmegewinne. In Sinne dieser Arbeit ist diese Wärmequelle irrelevant. Deswegen entfällt die detaillierte Betrachtung.

5.2.3.4 Lüftungswärmquellen durch Luftaustausch von/zu anderen Zonen

Wenn im Kühlfall die Lufttemperatur bei Luftaustausch zwischen bilanzierter Zone und benachbarter Zone mindestens 4°C höher ist als bei der bilanzierten Zone, tritt ein Lüftungswärmeeintrag auf (DIN V 18599-2 2011).

$$Q_{V,z} = \dot{V}_{z,d} c_{P,a} \rho_a (\theta_z - \theta_i) t \quad 5.20$$

mit:	$\dot{V}_{z,d}$	der eintretende Volumenstrom der benachbarten Zone im Mittel über den Tag
	V	das Nettoraumvolumen
	$c_{P,a}$	die spezifische Wärmekapazität von Luft

ρ_a	die Dichte von Luft.
θ_z	die durchschnittliche Temperatur (Bilanz-Innentemperatur) in der Zone, aus der die Luft eintritt
θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

$c_{p,a}\rho_a$ kann 0,34 [Wh/m³·K] gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011).

5.2.4 Interne Wärmequellen $Q_{l,source}$

Die Zusammenfassung der internen Wärmequellen zeigt folgende Gleichung.

$$Q_{l,source} = \sum Q_{l,source,p} + \sum Q_{l,source,l} + \sum Q_{l,source,fac} + \sum Q_{l,source,goods} + \sum Q_{l,source,h} \quad 5.21$$

- mit:
- $Q_{l,source,p}$ der Wärmeeintrag durch Personen
 - $Q_{l,source,l}$ der Wärmeeintrag durch künstliche Beleuchtung
 - $Q_{l,source,fac}$ der Wärmeeintrag durch Geräte und Maschinen
 - $Q_{l,source,goods}$ Der Wärmeeintrag durch in die Gebäudezone eingebrachte Güter
 - $Q_{l,source,h}$ der Wärmeeintrag/Kälteeintrag durch Heiz- und Kühlsysteme

5.2.4.1 Wärmequelle durch Personen

Die abgegebene Wärme durch Personen ist abhängig von der Personenanzahl und der Aktivität der Personen. In DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011) wird die Wärmequelle durch Personen abhängig von der Bezugsfläche der Gebäudezone angegeben. Die Wärmeabgabe ist nach folgender Formel zu bilanzieren.

$$Q_{l,source,p} = Q_{l,p} A_B \quad 5.22$$

- mit:
- $Q_{l,p}$ die durchschnittliche tägliche Wärmeabgabe von Personen, bezogen auf die Bezugsfläche nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
 - A_B die Bezugsfläche der Gebäudezone.

5.2.4.2 Wärmequellen durch künstliche Beleuchtung

Der größte Teil des elektrischen Bedarfs durch künstliche Beleuchtung wird in Wärme umwandelt. Deswegen werden Wärmeerträge durch künstliche Beleuchtung in der Gebäudezone angesetzt. In den Gebäudezonen, die einen Teil der erzeugten Wärme durch künstliche Beleuchtung durch die Abluft abtransportieren, kommt ein Faktor als Raumbelastungsgrad zur Berechnung hinzu. Die Wärmegewinne durch künstliche Beleuchtung in einer Gebäudezone sind nach folgender Gleichung zu berechnen.

$$Q_{l,\text{source},l} = \mu_l Q_{l,f} \quad 5.23$$

mit:

μ_l	der Raumbelastungsgrad für die Beleuchtung nach DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011)
$Q_{l,f}$	der durchschnittliche tägliche elektrische Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung nach DIN V 18599-4 (DIN V 18599-4 2011)

Wenn Gebäudezone keine Abluftleuchten hat, gilt $\mu_l = 1$

5.2.4.1 Wärmequellen durch Geräte und Maschinen

Die elektrische Geräten und Maschinen, die in der Gebäudezone im Betrieb kommen, erzeugen Wärme. Diese erzeugen Wärme wird nach folgt Flächenbezogen bilanziert.

$$Q_{l,\text{source},\text{fac}} = q_{l,\text{fac}} A_B \quad 5.24$$

mit:

$q_{l,\text{fac}}$	die durchschnittliche tägliche Wärmeabgabe von Geräten oder Maschinen, bezogen auf die Bezugsfläche nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
A_B	die Bezugsfläche der Gebäudezone

5.2.4.2 Wärmequellen durch Stofftransport

In den betrachteten Wohngebäuden gibt es keine regelmäßigen Stoffe oder Güter, die in die Gebäude eingebracht werden. Deswegen gibt es keine Wärmegewinne in dieser Gebäudezone durch Stofftransport.

5.2.4.3 Wärmequellen/-senken durch Heiz-, Trinkwasser- und Lüftungssystem

In Gebäudezonen entsteht manchmal Wärme- und Kälteeintrag durch Anlagensysteme wie Heizung, Kühlung, Lüftung und Trinkwarmwasser. Die Wärme- und Kältequellen kommen normalerweise durch Energieerzeugung, Energiespeicherung, Verteilung der Energie (Luftkanäle und Rohren) und Hilfsenergie der Anlagen wie Ventilatoren auf. Die Wärme- Und Kälteabgabe ist in der Gebäudezone ungeregelt und kann nicht

einfach gemittelt berechnet werden. Diese Wärmequellen und Wärmesenken werden in dieser Arbeit nur benannt.

$$Q_{l,source,h} = Q_{l,w} + Q_{l,h} + Q_{l,vh} + Q_{l,ch} \quad 5.25$$

mit:

$Q_{l,w}$	der unregelmäßige Wärmeeintrag in die Zone durch das Trinkwarmwassersystem nach DIN V 18599-8 (DIN V 18599-8 2011)
$Q_{l,h}$	der unregelmäßige Wärmeeintrag in die Zone durch das Heizungssystem DIN V 18599-5 und aus DIN V 18599-7 (DIN V 18599-7 2011)
$Q_{l,vh}$	der unregelmäßige Wärmeeintrag in die Zone durch mechanische Lüftung nach DIN V 18599-6 (DIN V 18599-6 2011) und DIN V 18599-7 (DIN V 18599-7 2011)
$Q_{l,ch}$	der unregelmäßige Wärmeeintrag in die Zone durch das Kühlsystem/die Kälteerzeugung (gegebenenfalls Erzeugung in der Zone) nach DIN V 18599-7 (DIN V 18599-7 2011)

5.3 Ausnutzungsgrad für Wärmequellen η

Die Ausnutzungsgrad der Wärmequellen wird wie in Teil 3.3 berechnet

6 Energetische Bilanzierung vom Badgire angepasst zur DIN V 18599-2 und DIN V 18599-6

Badgire dienen im Sommer als Lüftungs- oder Kühlelemente. Badgire nutzt man traditionell in Sommerhäusern, die im Winter nicht genutzt werden. Alternativ werden die Badgire im Winter thermisch verschlossen.

Badgire dienen im Sommer als Kühlelemente und ersetzen warme Innenluft durch kühlere Frischluft. Das heißt, die Badgire weisen Kälteeinträge auf (negative Wärmegewinne). Gemäß DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011) werden zur Bilanzierung des Kühlbedarfs nur die Wärmegewinne bilanziert. Die Wärmesenken in der Bilanzierung des Kühlbedarfs beeinflussen den Ausnutzungsgrad der Wärmequellen. Je mehr Wärmesenken im Laufe der Kühlperiode anfallen, desto geringer sind die Anteile der Wärmequellen nutzbar. Das bedeutet, dass der nutzbare Anteil der Wärme im Gebäude geringer ist. Der Kälteeintrag durch Badgire reduziert die Wärmegewinne durch Wärmequellen. Deswegen kann der Kälteeintrag der Badgire harmonisiert mit der DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011) als Lüftungswärmesenke bilanziert werden.

In diesem Kapitel wird daher ein Bilanzierungsansatz für Badgire implementiert in die DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011) beschrieben. Diese Bilanzierung wird gemäß der Untersuchungen von Prof. Bahadori (Bahadori, Dehghani 2008), der ein Sammelwerk von mehr als 300 Quellen aus praktischen Untersuchungen und numerischen Berechnungen herausgegeben hat, genutzt.

Lüftungswärmesenken entstehen gemäß DIN V 18599-2 (DIN V 18599-2 2011) in Folge Infiltration durch Undichtigkeiten sowie durch natürliche und mechanische Lüftung sowie durch Luftaustausch mit angrenzenden Zonen. Es wird in dieser Arbeit vorgeschlagen, die Lüftungswärmegewinne durch Badgire als separaten Term in den Lüftungswärmesenken zu addieren. Die ergänzte Berechnungsformel stellt sich wie folgt dar:

$$Q_V = \sum Q_{V,\text{inf}} + \sum Q_{V,\text{win}} + \sum Q_{V,\text{mech}} + \sum Q_{V,z} + \sum Q_{V,b} \quad 6.1$$

mit:	Q_V	die Summe der Lüftungswärmesenken
	$Q_{V,\text{inf}}$	die Lüftungswärmesenken durch Infiltration von Außenluft
	$Q_{V,\text{win}}$	die Lüftungswärmesenken durch Fensterlüftung
	$Q_{V,\text{mech}}$	die Lüftungswärmesenken durch mechanische Lüftungsanlagen
	$Q_{V,z}$	die Lüftungswärmesenken durch Luftaustausch von/zu anderen Zonen
	$Q_{V,b}$	die Wärmesenken (Kälteeintrag) durch Badgire

In dieser Arbeit werden Badgire zur Bilanzierung in zwei unterschiedliche Typen unterteilt. Bagiren als Lüftungselement und Badgire mit adiabatischer Kühlung.

6.1 Badgire als Lüftungselement

Die Badgire als Lüftungselement ermöglichen den Luftaustausch zwischen der Gebäudezone und der Außenluft.

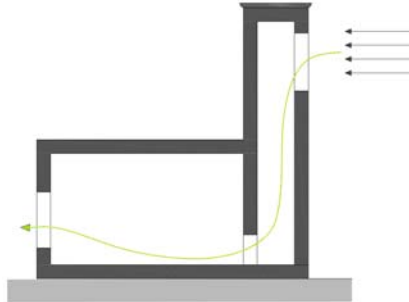


Abb. 6-1: Badgir als Lüftungselement (Eigene Darstellung)

Die Lüftungswärmesenken durch solche Badgire können wie folgt berechnet werden:

$$Q_{V,b} = V_b c_{P,a} \rho_a (\theta_i - \theta_e) t \quad 6.2$$

mit: $Q_{V,b}$	Die Wärmeverluste durch Badgir
V_b	Der Luftvolumenstrom vom Badgir nach Formel 6.3
$c_{P,a}$	die spezifische Wärmekapazität von Luft
ρ_a	die Dichte von Luft
θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
θ_e	die durchschnittliche monatliche Außentemperatur nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

In der oberen Formel muss die Rohdichte der Badgirluft eingesetzt werden. Als Vereinfachung kann näherungsweise die Rohdichte der Außenluft eingesetzt werden.

$c_{P,a} \rho_a$ kann 0,34 [Wh/m³·K] gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011)

Der Mittelwert des Luftvolumenstroms des Badgirs wird abhängig von der Dimension des Badgirs, von der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und der Rohdichte der Luft im Badgir berechnet.

$$V_b = A_{b,o} \left(\Delta C_P v_w^2 \right)^{0,5} \quad 6.3$$

mit: V_b	der Luftvolumenstrom des Badgirs
------------	----------------------------------

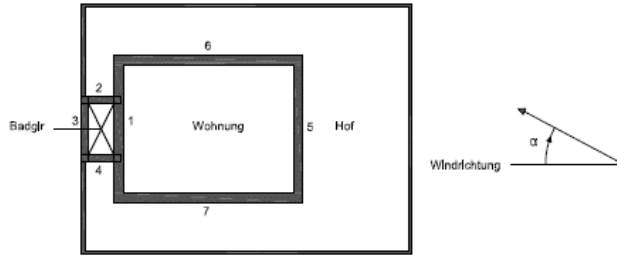
$A_{b,o}$	die Öffnungsfläche des Badgirs
ΔC_P	Winddruckbeiwert gemäß Tab. 6.1 oder Tab. 6.2
v_w	Die mittlere Windgeschwindigkeit
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

Die gemessenen Winddruckbeiwerte sind nach folgender Tabelle abzulesen (Karakatsanis, Bahadori, Vickery 1986b) / (Karakatsanis, Bahadori, Vickery 1986a).

Die Winddruckbeiwerte sind für zwei verschiedene Regionen gegeben. Erste Werte gelten für die Gebäude, die in der Stadt stehen und zweite für die Gebäude, die außerhalb der Stadt stehen.

Öffnung		1	2	3	4	5	6	7
Windrichtung α	0	0,86	-0,49	-0,30	-0,47	0,05	0,08	-0,01
	15	0,91	-0,44	-0,30	-0,35	0,03	0,06	-0,00
	30	0,70	-0,39	-0,28	0,26	0,03	0,03	-0,05
	45	0,41	-0,35	-0,29	0,67	-0,13	-0,08	-0,17
	60	0,03	-0,35	-0,36	0,83	-0,23	-0,16	-0,28
	75	-0,49	-0,36	-0,49	0,86	-0,30	-0,23	-0,37
	90	-0,74	-0,35	-0,7	0,88	-0,35	-0,28	-0,43
	105	-0,68	-0,38	-0,52	0,91	-0,36	-0,35	-0,47
	120	-0,65	-0,42	0,11	0,85	-0,31	-0,43	-0,33
	135	-0,61	-0,46	0,48	0,61	-0,28	-0,46	-0,18
	150	-0,52	-0,49	0,72	0,04	-0,22	-0,41	-0,15
	165	-0,42	-0,55	0,83	-0,57	-0,12	-0,32	-0,30
	180	-0,39	-0,61	0,83	-0,64	-0,13	-0,30	-0,34

Tab. 6.1: Winddruckbeiwert für verschiedene Punkte und verschiedene Windrichtung für die Gebäuden innerhalb der Stadt (Karakatsanis, Bahadori, Vickery 1986b) / (Karakatsanis, Bahadori, Vickery 1986a)



Öffnung		1	2	3	4	5	6	7
Windrichtung α	0	0,84	-0,52	-0,30	-0,51	0,07	0,02	-0,03
	15	0,9	-0,46	-0,30	-0,43	-0,12	0,00	-0,03
	30	0,69	-0,43	-0,29	0,26	0,01	0,06	-0,1
	45	0,38	-0,36	-0,32	0,66	-0,20	-0,11	-0,24
	60	0,01	-0,35	-0,35	0,79	-0,34	-0,22	-0,38
	75	-0,64	-0,41	-0,51	0,83	-0,40	-0,32	-0,48
	90	-0,85	-0,42	-0,75	0,85	-0,45	-0,37	-0,53
	105	-0,70	-0,44	-0,70	0,88	-0,48	-0,44	-0,58
	120	-0,67	-0,48	0,07	0,93	-0,39	-0,51	-0,40
	135	-0,61	-0,50	0,46	0,64	-0,37	-0,54	-0,24
	150	-0,52	-0,49	0,72	0,04	-0,22	-0,41	-0,15
	165	-0,42	-0,55	0,83	-0,57	-0,12	-0,32	-0,30
	180	-0,39	-0,61	0,83	-0,64	-0,13	-0,30	-0,34

Tab. 6.2: Winddruckbeiwert für verschiedene Punkte und verschiedene Windrichtung für die Gebäuden außerhalb der Stadt (Karakatsanis, Bahadori, Vickery 1986b) und (Karakatsanis, Bahadori, Vickery 1986a)

Im Laufe der Kühlperiode kann der Badgir nachts Kälte in seine Masse speichern (bzw. physikalisch richtiger formuliert die Energie an die kalte Außenluft abgeben), die er tagsüber zum Raum abgeben kann (bzw. physikalisch richtiger formuliert, die so dass er tagsüber dem Raum wieder Energie entziehen kann). Die Speichermassen sind in der Regel ein bis zwei Stunden entladen (Bahadori, Deghani 2008). Aus diesem Grund kann man die Rohdichte der Außenluft als Rohdichte der Badgirluft ersetzen, wenn es keinen genauen Wert für die Rohdichte der Badgirluft gibt.

6.2 Badgire mit adiabater Kühlung

Wie in im Teil 2.3.4 erklärt, dienen moderne Badgire als adiabatische Kühlungselemente, die ohne Wind kühlen können. Diese Badgire funktionieren mit

Schwerkraft. Weil die Luft im Badgir aufgrund befeuchteter Holzwolletücher, durch die die Luft strömt, feucht ist, ist sie schwerer als die Raumluf. Aus diesem Grund strömt die Badgirluft, die kühler als die Innenluft ist, nach Innen und verdrängt die warme Innenluft bzw. vermischt sich mit dieser.

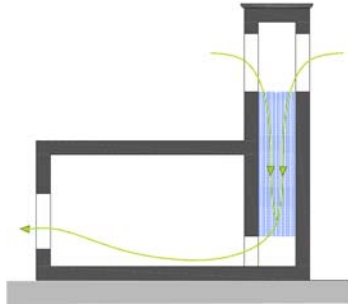


Abb. 6-2: Funktionsprinzip eines Badgirs mit adiabatischer Kühlung (Eigene Darstellung)

Die Lüftungswärmesenken durch diese Badgire können nach folgender Formel bilanziert werden. Gemäß dieser Gleichung und der nachfolgenden Gleichungen sind die Lüftungswärmesenken durch moderne Badgire genauer zu bilanzieren.

$$Q_{V,b} = \eta_b V_b c_{P,a} \rho_a (\theta_{wb,a} - \theta_i) t \quad 6.4$$

mit: $Q_{V,b}$	Die Lüftungswärmesenken durch Badgir
η_b	Der adiabatische Wirkungsgrad des Badgirs nach Formel 6.5 oder 6.6
V_b	der Mittelwert des Luftvolumenstroms vom Badgir nach Formel 6.11
$c_{P,a}$	die spezifische Wärmekapazität von Luft
ρ_a	die Dichte von Luft
$\theta_{wb,a}$	Die Feuchtkugeltemperatur der Luft nach psychrometric charts
θ_i	die Bilanz-Innentemperatur der Gebäudezone nach DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10 2011)
t	die Dauer des Berechnungszeitraums

$c_{P,a} \rho_a$ kann 0,34 [Wh/m³·K] gesetzt werden (DIN V 18599-2 2011)

Der adiabatische Wirkungsgrad des Badgirs ist abhängig von Geometrie der Holzwolle, Feuchte der Holzwolle und Luftgeschwindigkeit durch die Holzwolle hindurch.

Eine empirische Formel zu Berechnung des adiabatischen Wirkungsgrads eines Badgirs mit feuchter Holzwolke mit Gitterabstand von 10cm ist gegeben. (siehe Abb. 6-3)

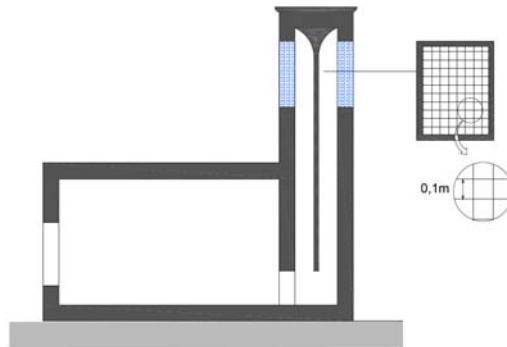


Abb. 6-3: Feuchte Holzwolke eines Badgirs mit Gitterabstand 10cm (Eigene Darstellung)

Der adiabatische Wirkungsgrad des Badgirs wird in zwei Windgeschwindigkeitskategorien empirisch rausgegeben. (Bahadori, Dehghani 2008)

- Wenn Luftgeschwindigkeit durch Holzwolke geringer als 1[m/s] ist:

$$\eta_b = (-0,023v_h + 0,889) + \left((0,046 - 0,014d_h) \ln\left(\frac{d_h}{0,025}\right) \right) \quad 6.5$$

- Wenn Luftgeschwindigkeit durch Holzwolke zwischen 1 und 2m/s] ist:

$$\eta_b = \left(\begin{aligned} &(-0,045v_h^4 + 0,260v_h^3 - 0,635v_h^2 + 0,577v_h + 0,714) \\ &+ \left((0,046 - 0,014d_h) \ln\left(\frac{d_h}{0,025}\right) \right) \end{aligned} \right) \quad 6.6$$

mit: η_b Der adiabatische Wirkungsgrad des Badgirs
 v_h Luftgeschwindigkeit durch Holzwolke nach Formel 6.7
 d_h Die Dicke der Holzwolke

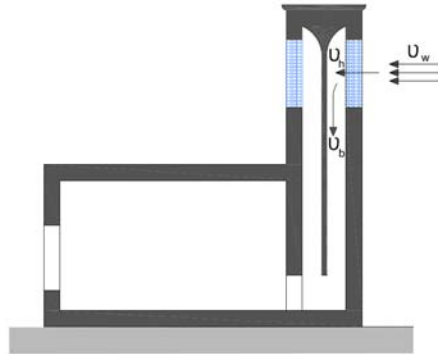


Abb. 6-4: Luftgeschwindigkeit in verschiedene Stelle (Eigene Darstellung)

Die Luftgeschwindigkeit durch Holzwolle wird wie folgt berechnet.

$$v_h = \left(\frac{A_b}{A_h} \right) \left(\frac{gh_b (\rho_{a,b} - \rho_a) + \left(\rho_a \frac{1}{2} \Delta C_p v_w^2 \right) - \Delta P_h}{\frac{1}{2} \rho_{a,b}} \right)^{0,5} \quad 6.7$$

mit:	v_h	Luftgeschwindigkeit durch Holzwolle
	A_b	Schnittfläche des Badgirs
	A_h	Öffnungsfläche des Badgirs mit Holzwolle
	g	Erdbeschleunigung
	h_b	Effektive Höhe des Badgirs
	$\rho_{b,a}$	die Dichte von Luft im Badgir
	ρ_a	die Dichte von Luft
	ΔC_p	Winddruckbeiwert nach Tab. 6.1 oder Tab. 6.2
	ΔP_h	Minderungsdruck wegen der Holzwolle in Badgiröffnung nach Formel 6.8 oder 6.9

Die Minderungsdrucke wegen der Holzwolle wurden für oben gezeigte Holzwolle für zwei verschiedene Luftgeschwindigkeitsklassen gemessen. Die s.g. Minderungsdrucke sind nach unterer Gleichungen zu berechnen (Bahadori, Dehghani 2008).

- Wenn die Luftgeschwindigkeit durch die Holzwolle unter 1[m/s]

$$\Delta P_h = 33,30 v_h d_h^{0,755} \quad 6.8$$

- Wenn die Luftgeschwindigkeit durch die Holzwolle zwischen 1[m/s] und 2[m/s] ist:

$$\Delta P_h = \left(29,94v_h^4 - 158,56v_h^3 + 331,55v_h^2 - 225,16v_h + 64,31 \right) d_h^{0,755} \quad 6.9$$

- mit: ΔP_h Minderungsdruck wegen der Holzwolle in Badgiröffnung
 v_h Luftgeschwindigkeit durch Holzwolle
 d_h die Dicke der Holzwolle

Die Luftgeschwindigkeit im Badgir beeinflusst nach Formel 6.10 die Lüftungswärmesenken durch den Badgir. Außer der Windgeschwindigkeit verursacht die Schwerkraft der feuchten Luft im adiabatischen Badgir den Druckunterschied. Deswegen ist die Luftgeschwindigkeit im adiabatischen Badgir nach folgender Gleichung zu berechnen.

$$V_b = A_b \left(\frac{gh_b(\rho_{a,b} - \rho_a) + \left(\rho_a \frac{1}{2} \Delta C_p v_w^2 \right) - \Delta P_h}{\frac{1}{2} \rho_{a,b}} \right)^{0,5} \quad 6.11$$

- mit: V_b Luftvolumenstrom Im Badgir
 A_b Schnittfläche des Badgirs
 g Erdbeschleunigung
 h_b Effektive Höhe des Badgirs
 ρ_{ab} die Dichte von Luft im Badgir
 ρ_a die Dichte von Luft
 ΔC_p Winddruckbeiwert nach Tab. 6.1 oder Tab. 6.2
 v_w Die mittlere Windgeschwindigkeit
 ΔP_h Minderungsdruck wegen der Holzwolle in Badgiröffnung nach 6.8 oder 6.9

7 Ermittlung der Heizwärme- und Kühlenergiebedarfs eines Einfamilienhauses mit Kollektor und Badgir

In diesem Kapitel wird ein Einfamilienhaus als Modell mit innovativer passiver Methode zur Heizung und Kühlung vorgestellt. Dies Modell hat an der Südseite eine Kollektorwand (Wand mit Luftkollektor) und an der Nordseite einen Badgir als adiabates Kühlungselement. Im Heizfall ist nur Luftkollektor in Betrieb, im Kühlfall sind Badgir und Luftkollektor beide in Kombination zu einander im Betrieb.

Der Luftkollektor als Gebäudebauteil kann in den Klimata, die hohe solare Einstrahlung haben, als Heizungselemente dienen. Dieses Element wandelt die Sonneneinstrahlung in Wärme um. Im Heizfall steigt die zur Wärme umgewandelte Energie im Kollektor in Folge des Kamineffektes nach oben. Die warme Luft kann durch die obere Klappe zum Raum einströmen. In der Folge des Überdrucks strömt die Innenluft durch die Bodenklappen in den Doppelboden und von dort aus wieder in den Luftkollektor, wo sie sich wiederum erwärmen kann. (siehe Abb. 7-1).

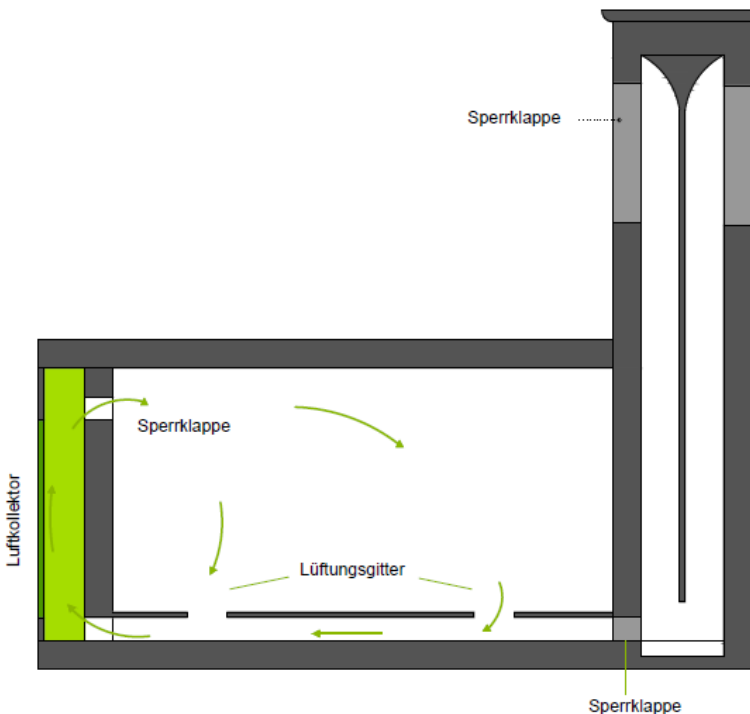


Abb. 7-1: Thermische Funktion eines Luftkollektors als Bauteil während der Heizperiode (Eigene Darstellung)

Wenn die Luft in die andere Richtung strömt, kann die Auftriebskraft gestört werden. Aus diesem Grund lassen die Einwegklappen nicht die Luft in die andere Richtung strömen. Der Luftaustausch zwischen Luftkollektor und Innenraum kann auch mit Hilfe eines Ventilators gesteuert werden. Nach Abb. 7-1 wurde die Südseite vom Gebäude

mit einem Luftkollektor aufgebaut und in der Nordseite ist ein Badgir als adiabate Kühlungselemente aufgebaut. Im Laufe der Heizperiode sind die untere und obere Sperrklappe vom Badgir zur Innenraum und Umgebungsluft geschlossen, so dass kein zusätzlicher Luftaustausch mit außen verursacht wird.

Während der Kühlperiode sind die obere und untere Klappe vom Badgir geöffnet. In den Öffnungen des Badgirs ist die Holzwolle installiert. Die Holzwolle wird immer befeuchtet. Die Befeuchtung kann mit eine Wasserbecken im unteren Teil des Badgirs und einer kleinen Umwälzpumpe hergestellt werden. Wegen der Schwerkraft der feuchten Luft fällt die feuchte Luft im Badgir nach unten. Wenn Winde wehen, entsteht ein Überdruck an der Badgiröffnung. (siehe Abb. 7-2)

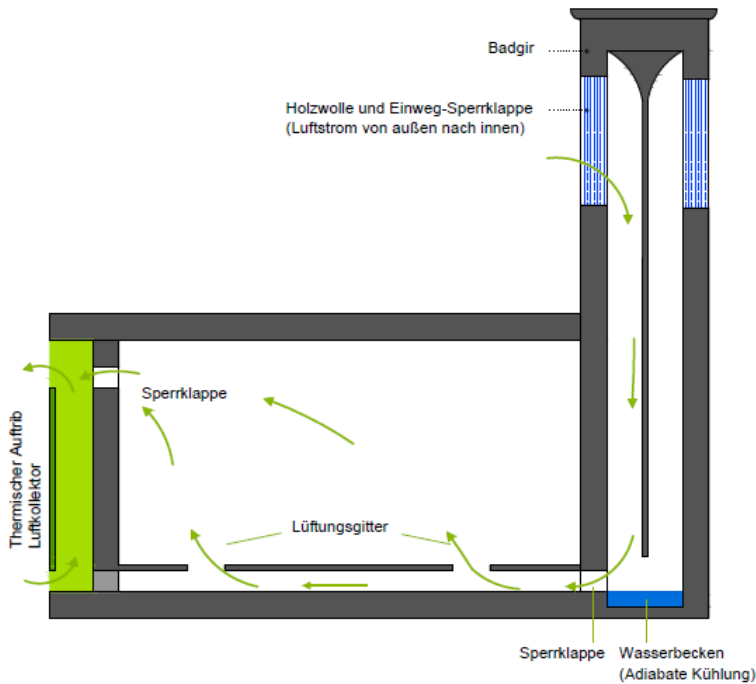


Abb. 7-2: Funktionsprinzip eines Badgirs im Verknüpfung mit einem Luftkollektor während der Kühlperiode (Eigene Darstellung)

Der fallende adiabatisch gekühlte Luftvolumenstrom strömt durch die untere Badgirklappe ins Gebäude. Die warme Innenluft strömt nach Oben. In dieser Zeit sind die untere und obere Luftkollektorklappe zur Umgebungsluft geöffnet. Wegen der Sonnenstrahlung auf dem Luftkollektor wird die Luft im Luftkollektor warm, es entsteht Auftrieb. Dieser Auftriebskraft verursacht einen Unterdruck an der oberen Klappe zwischen dem Kollektor und dem Raum. Aus diesem Grund wird die warme Innenluft durch den Auftrieb im Kollektor nach außen gesaugt und lässt die adiabatisch gekühlte Luft des Badgirs von der Bodenklappe her einströmen.

Als Modell wird ein typisches Einfamilienhaus im Isfahan (Iran) mit zwei Etagen mit 208 m² Wohnfläche bilanziert (siehe Abb. 7-3). Zuerst wird der Heiz- und Kühlbedarf dieses Gebäudes mit Hilfe DIN V 18599-2 bilanziert. Dann wird das Gebäude mit

Luftkollektor und Badgir ausgerüstet (siehe Abb. 7-4) und auf Basis der in dieser Arbeit entwickelten Formeln in den Kapiteln 4 und 6 bilanziert. Letztendlich sind der Deckungsgrad des Luftkollektors auf den Heizwärmebedarf und der Deckungsgrad des Badgirs auf den Kühlbedarf des Gebäudemodells zu berechnen.

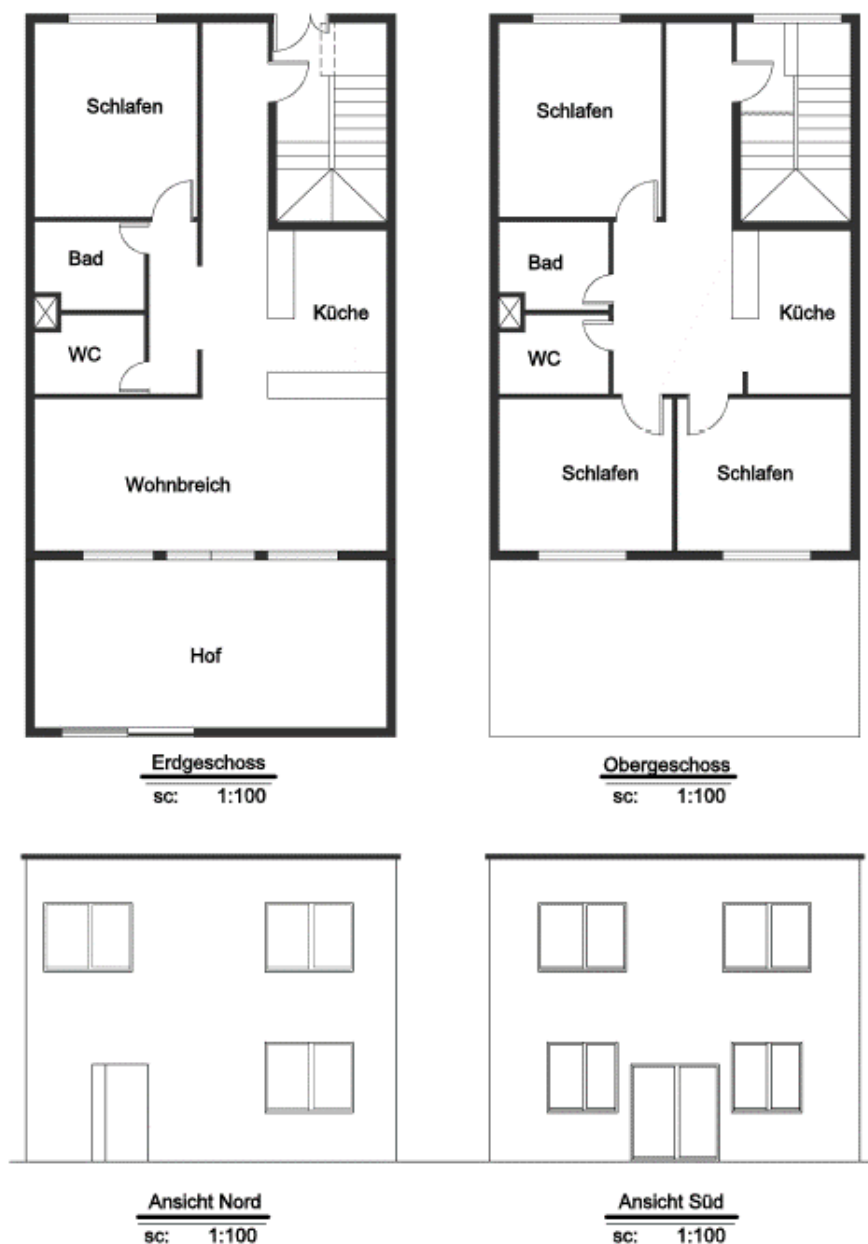


Abb. 7-3: typisches Einfamilienhaus in Isfahan (Iran) (Eigene Darstellung)



Abb. 7-4: typisches Einfamilienhaus ausgerüstet mit Luftkollektor und Badgir in Isfahan (Iran)
(Eigene Darstellung)

7.1 Bilanzierung des Heizwärmebedarfs des Gebäudemodells

Um den Heizwärmebedarf eines Gebäudes zu bilanzieren, müssen die Wärmesenken und Wärmequellen des Gebäudes getrennt berechnet werden.

7.1.1 Bilanzierung der Wärmesenken Q_{sink}

Wärmesenken dieses Gebäudemodells bestehen aus Transmissionswärmesenken und Lüftungswärmesenken.

7.1.1.1 Transmissionswärmesenken Q_T

Die Transmissionswärmeverluste dieses Gebäudes werden gemäß Formel 3.4 bilanziert. Dafür sind die Fläche jedes Außenbauteils nach Abb. 7-3 und Abb. 7-4 in der Tab. 7.1 gegeben. Die thermische Eigenschaft der verschiedenen Bauteile sind nach der iranischen nationalen Gebäudevorschrift (National Building Regulation of Iran 2010) in der Tab. 7.1 abgebildet.

Außenhülle	Fläche [m ²]	U-Wert [W/m ² .K]	g-Wert [-]
Wand_ Süd	42,6	0,8	-
Wand_ Ost	0	benachbart	-
Wand_ West	0	benachbart	-
Wand_ Nord	46	0,8	-
Dach	104	0,5	-
Boden	104	1,45	-
Fenster_ Süd	15,4	2,7	0,68
Fenster_ Ost	0	benachbart	-
Fenster_ West	0	benachbart	-
Fenster_ Nord	11,8	2,7	0,68

Tab. 7.1: Bauteilfläche und thermische Eigenschaft des Gebäudemodells

Darüber hinaus ist die monatliche Außentemperatur im Laufe der Heizperiode (Oktober bis April) vom Isfahan und die Zeit (Stunde pro Monat) in der Tab. 7.2 nach Meteorolog. Wetterdaten gegeben (Meteotest 2014).

Isfahan	Mittlere monatliche Umgebungstemperatur [°C]						
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Okt	Nov	Dez
Θ [°C]	2,9	5,3	10,5	15,6	16,9	9,7	4,5
t [h/Monat]	744	672	744	720	744	720	744

Tab. 7.1: Mittlere monatliche Außentemperatur von Isfahan während der Heizperiode

Die monatlich bilanzierten Transmissionswärmesenken der Bauteile werden in der Tab. 7.3 aufgeführt.

Monatliche Transmissionswärmeverluste durch Außenbauteile [kWh]							
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Okt	Nov	Dez
Wand-Süd	489	378	270	122	87	285	443
Wand- Ost	0	0	0	0	0	0	0
Wand- West	0	0	0	0	0	0	0
Wand- Nord	616	556	616	596	616	596	616
Dach	930	840	930	900	930	900	930
Boden	360	325	360	349	360	349	360
Fenster- Süd	638	577	638	618	638	618	638
Fenster- Ost	0	0	0	0	0	0	0
Fenster- West	0	0	0	0	0	0	0
Fenster- Nord	491	444	491	475	491	475	491

Tab. 7.2: Transmissionswärmesenken durch jeden Außenbauteile

7.1.1.2 Lüftungswärmesenken Q_v

Der gesamte Luftaustausch vom Gebäudemodell wird mit 0,6 mal pro Stunde angenommen (DIN V 4108-6 2003). Gemäß der Formel 3.9 werden die monatlichen Lüftungswärmesenken des Gebäudemodells berechnet (Siehe Tab. 7.3).

Monatliche Lüftungswärmeverluste [kWh]							
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Okt	Nov	Dez
Verluste	1385	1071	766	347	247	807	1255

Tab. 7.3: Lüftungswärmesenken durch jeden Außenbauteile

7.1.2 Bilanzierung der Wärmequellen Q_{source}

Im Gebäudemodell sind zwei Wärmequellengruppen relevant: Wärmequellen aufgrund der Sonneneinstrahlung und die inneren Wärmequellen. Die Strahlungsintensität auf verschiedene Fläche ist in der Tab. 7.4 zu sehen (Meteotest 2014).

Mittlere monatliche Strahlungsintensität [W/m^2]								
Orientierung	Neigung	Jan	Feb	Mrz	Apr	Okt	Nov	Dez
Horizontal	0	126	138	170	274	212	146	142
Süd	90	176	149	128	138	215	197	230
Ost	90	95	98	119	178	151	107	111
West	90	68	78	89	140	109	84	78
Nord	90	35	39	54	63	44	38	34

Tab. 7.4: Mittlere monatliche Strahlungsintensität auf verschiedene Flächen in Isfahan während der Heizperiode (Iran) (Meteotest 2014)

7.1.2.1 Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung Q_s

Die Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung durch transparente und opake Flächen werden durch Formel 3.16 und 3.17 berechnet. Die Wärmegewinne des Gebäudemodells werden in der Tab. 7.5 abgebildet.

Monatliche Wärmegewinne aufgrund solare Einstrahlung durch Außenbauteile [kWh]							
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Okt	Nov	Dez
Fenster-Süd	305	211	221	223	371	320	397
Fenster- Ost	0	0	0	0	0	0	0
Fenster- West	0	0	0	0	0	0	0
Fenster- Nord	3	3	6	11	6	4	4
Wand- Süd	27	13	13	14	39	31	44
Wand - Ost	0	0	0	0	0	0	0
Wand- West	0	0	0	0	0	0	0
Fenster- Nord	0	0	0	0	0	0	0
Dach	8	6	38	101	68	18	19

Tab. 7.5: Monatliche solare Wärmegewinne durch transparente und opake Gebäudebauteile

Im Modell wird die Südwand als Kollektorwand aufgebaut. Diese Kollektorwand hat den statischen U-Wert von $0,8 \text{ [W/(m}^2\cdot\text{K)]}$ (National Building Regulation of Iran 2010). Die Außenschicht vom Luftkollektor ist aus Polycarbonat-Stegplatten mit dem U-Wert von $1,3 \text{ [W/(m}^2\cdot\text{K)]}$ und dem g-Wert von $0,66$ konstruiert (PC 35406) (RODECA GmbH 2014). Der Luftaustausch zwischen Luftkollektor und Raum ist mit $0,02 \text{ [m}^3\text{/s]}$ angenommen.

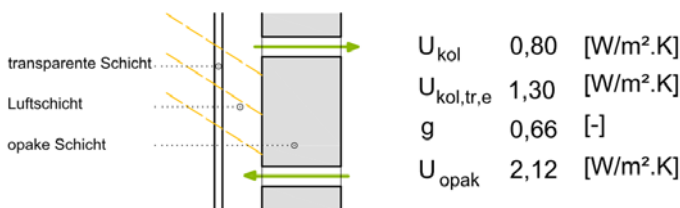


Abb. 7-5: Eigenschaften der aufgebauten Luftkollektor (Eigene Darstellung)

Die Tab. 7.6 zeigt den solaren Wärmeeintrag durch den südlichen Luftkollektor, der nach Gleichung 4.9 berechnet wurde.

Monatliche Wärmegewinne durch südliche Luftkollektor [kWh]							
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Okt	Nov	Dez
Luftkollektor	905	621	650	657	1105	949	1184

Tab. 7.6: Monatliche solare Wärmegewinne durch Luftkollektor

7.1.2.2 Interne Wärmequellen Q_i

Für interne Wärmequellen werden 4 Personen, die 60 Prozent der Zeit zu Hause sind, angesetzt. Die elektrische Last wie Kochen, Technische Geräte, Kühlschrank, Wasserkocher, Waschmaschine, Geschirrspüler, Wäschetrockner und Beleuchtung wird mit insgesamt 290 Watt angenommen (DIN V 4108-6 2003)

Monatliche Wärmegewinne durch interne Wärmequellen [kWh]							
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Okt	Nov	Dez
Personen	116	105	116	112	116	112	116
elektrisch	216	195	216	209	216	209	216

Tab. 7.7: Monatliche interne Wärmequellen

Die monatlich abgegebene Wärme durch die internen Wärmequellen sind in der Tab. 7.7 angezeigt.

7.1.3 Ausnutzungsgrad für Wärmequellen η

Um den Heizwärmebedarf eines Gebäudes zu bilanzieren, ist der Ausnutzungsgrad der Wärmequellen nötig. Deswegen wird der Ausnutzungsgrad von Wärmequellen

nach Formel 3.25 berechnet. Einmal wurde der Ausnutzungsgrad der Wärmequellen des Gebäudemodells ohne Luftkollektor und einmal mit Luftkollektor berechnet (Siehe Tab. 7.8 und Tab. 7.9).

Monatliche Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne [-]							
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Okt	Nov	Dez
Ausnutzungsgrad	0,88	0,89	0,88	0,86	0,82	0,86	0,86

Tab. 7.8: Monatliche Ausnutzungsgrad der Wärmequellen ohne Kollektor

Monatliche Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne [-]							
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Okt	Nov	Dez
Ausnutzungsgrad	0,76	0,79	0,77	0,74	0,65	0,72	0,71

Tab. 7.9: Monatliche Ausnutzungsgrad der Wärmequellen Mit Kollektor

7.1.4 Deckungsgrad vom Luftkollektor

Letztendlich wird der Heizwärmebedarf des Gebäudes ohne- und mit Kollektor gemäß Formel 3.1 berechnet.

Monatlicher Heizwärmebedarf des Gebäudes ohne Kollektor							
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Okt	Nov	Dez
Wärmesenken [kWh]	4909	4190	4072	3407	3370	4029	4733
Wärmequelle [kWh]	676	534	610	670	816	694	810
Ausnutzungsgrad [-]	0,88	0,89	0,87	0,84	0,81	0,86	0,86
Heizwärmebedarf [kWh]	4313	3715	3538	2843	2709	3434	4038
Heizwärmebedarf [kWh/m²]	21	18	17	14	13	16	19

Tab. 7.10: Monatliche Heizwärmebedarf des Gebäudemodells ohne Luftkollektor

Monatliche Heizwärmebedarf des Gebäudes mit Kollektor							
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Okt	Nov	Dez
Wärmesenken [kWh]	4909	4190	4072	3407	3370	4029	4733
Wärmequelle [kWh]	1572	1149	1222	1226	1853	1625	1975
Ausnutzungsgrad [-]	0,76	0,79	0,77	0,74	0,65	0,72	0,71

Heizwärmebedarf [kWh]	3711	3283	3125	2499	2165	2863	3329
Heizwärmebedarf [kWh/m²]	18	16	15	12	10	14	16

Tab. 7.11: Monatliche Heizwärmebedarf des Gebäudemodells mit Luftkollektor

Der Heizwärmebedarf des Gebäudemodells ohne Luftkollektor ist gleich 118 [kWh/m².a], wobei das Modell mit südlichem Luftkollektor 101 [kWh/m².a] Heizwärmebedarf aufweist. Der Deckungsgrad des südlichen Luftkollektors bezogen auf den Heizwärmebedarf des Gebäudes ist 14 Prozent.

7.2 Bilanzierung des Kühlenergiebedarfs vom Gebäudemodell

Erstmal werden die Wärmesenken und Wärmequellen des Gebäudemodells bilanziert, um den Kühlenergiebedarf bilanzieren zu können.

7.2.1 Wärmesenken Q_{sink}

Im Klima vom Isfahan ist die mittlere monatliche Außentemperatur nie 4°K geringer als die Innensolltemperatur (25°C (DIN V 18599-10 2011)). Aus Diesem Grund fallen keine Wärmesenken beim einfachen Modell (ohne Badgir) an. Das Gebäudemodell mit Badgir nach Abb. 7-4 hat aber große Lüftungswärmeverluste, die bilanziert werden sollten.

Um Lüftungswärmeverluste des Badgirs zu bilanzieren, sind die Klimaeigenschaften und Eigenschaften vom Badgir nötig. Die mittlere monatliche Umgebungstemperatur, Feuchtkugelttemperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Laufe der Kühlperiode sind gegeben (Meteotest 2014).

Isfahan	Mittlere monatliche Umgebungsbedingung				
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
Θ_e [°C]	21,4	26,8	29,5	28,0	23,2
Θ_{wet} [°C]	10,9	13,2	15,0	14,1	11,3
RH [%]	30	23	23	23	26
V_{wind} [m/S]	5,4	4,8	4,8	4,4	3,3
R_{wind} [grad]	188	197	202	199	186
t [h/Monat]	744	720	744	744	720

Tab. 7.2: Mittlere monatliche Außentemperatur von Isfahan während der Kühlperiode

Der Badgir auf dem Gebäudemodell ist 3m höher als die Dachfläche und hat eine Länge von 2m und eine Breite vom 1m. Alle vier Seiten haben Öffnungen mit einer Höhe vom 1,5m (siehe Abb. 7-4). Die Öffnungen haben Eiwegklappen, so dass die Luft nur von außen nach innen strömen kann. In allen vier Öffnungen sind befeuchte Holzwolegewebe mit 10cm Dicke eingebracht (siehe Abb. 6-3). Die

Lüftungswärmesenken durch den Badgir werden gemäß Gleichung 6.4 bis 6.11 berechnet. Die Ergebnisse sind in der Tab. 7.12 abgebildet.

Monatliche Wärmesenken durch Badgir [kWh]					
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
Badgir	99331	80196	70749	77621	90239

Tab. 7.12: Monatliche Lüftungswärmesenken durch Badgir

7.2.2 Bilanzierung der Wärmequellen Q_{source}

Für dieses Gebäudemodell sind zwei Wärmequellengruppen zu bilanzieren: Wärmequellen aufgrund der Sonneneinstrahlung und die inneren Wärmequellen. Die Strahlungsintensität auf verschiedene Flächen ist in der Tab. 7.13 zu sehen (Meteotest 2014).

Mittlere monatliche Strahlungsintensität [W/m^2]						
Orientierung	Neigung	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
Horizontal	0	199	229	232	215	179
Süd	90	73	64	69	90	116
Ost	90	124	140	140	138	122
West	90	98	108	113	103	89
Nord	90	59	68	64	51	38

Tab. 7.13: Mittlere monatliche Strahlungsintensität auf verschiedene Flächen in Isfahan (Iran) (Meteotest 2014)

7.2.2.1 Wärmequellen aufgrund solarer Einstrahlung Q_s

Im Laufe der Kühlperiode sind die beiden Klappen vom Kollektor geöffnet (siehe Abb. 7-2) und die Luftaustausch mit der Außenluft ist hoch. Deswegen wird der solare Wärmeeintrag durch den Luftkollektor vernachlässigt. Auf diese Weise ist der solare Wärmegewinn vom südlichen Luftkollektor durch den einer opaken Wand ersetzt. Die solaren Wärmegewinne durch verschiedene Bauteile werden in der Tab. 7.14 aufgeführt.

Monatliche Wärmegewinne aufgrund solare Einstrahlung durch Außenbauteile [kWh]					
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
Fenster-Süd	85	72	80	104	131
Fenster- Ost	0	0	0	0	0
Fenster- West	0	0	0	0	0
Fenster- Nord	53	59	57	46	33
Wand- Süd	4	0	2	10	21
Wand - Ost	0	0	0	0	0
Wand- West	0	0	0	0	0
Fenster- Nord	0	0	0	0	0
Dach	168	199	209	187	138

Tab. 7.14: Monatliche solare Wärmegewinne durch Transparente und opake Gebäudebauteile

7.2.2.1 Interne Wärmequellen Q_I

Für interne Wärmequellen wurden 4 Personen, die 60 Prozent der Zeit zu Hause sind, angesetzt. Die elektrische Last wie Kochen, Technische Geräte, Kühlschrank, Wasserkocher, Waschmaschine, Geschirrspüler, Wäschetrockner und Beleuchtung wird mit insgesamt 290 Watt angenommen (DIN V 4108-6 2003).

Monatliche Wärmegewinne durch interne Wärmequellen [kWh]					
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
Personen	116	112	116	116	112
elektrisch	216	209	216	216	209

Tab. 7.15: Monatliche interne Wärmequellen

7.2.3 Ausnutzungsgrad für Wärmequellen η

Der Ausnutzungsgrad der Wärmequellen ist nach Formel 3.25 einmal für das Gebäude ohne Badgir und einmal für Gebäude mit Badgir berechnet.

Monatliche Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne [-]					
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
Ausnutzungsgrad	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99

Tab. 7.16: Monatliche Ausnutzungsgrad der Wärmequellen ohne Badgir

Monatliche Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne [-]					
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
Ausnutzungsgrad	0	0	0	0	0

Tab. 7.17: Monatliche Ausnutzungsgrad der Wärmequellen Mit Badgir

7.2.4 Deckungsgrad des Badgirs

Letztendlich wird der Kühlbedarf des Gebäudes ohne- und mit Badgir gemäß Formel 5.1 berechnet.

Monatliche Kühlbedarf des Gebäudes ohne Badgir					
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
Wärmesenken [kWh]	0	0	0	0	0
Wärmequelle [kWh]	579	972	1617	1289	590
Ausnutzungsgrad [-]	0	0	0	0	0
Kühlbedarf [kWh]	579	972	1617	1289	590
Kühlbedarf [kWh/m²]	3	5	8	6	3

Tab. 7.18: Monatliche Heizwärmebedarf des Gebäudemodells ohne Badgir

Monatliche Kühlbedarf des Gebäudes mit Badgir					
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
Wärmesenken [kWh]	99331	80196	70749	77621	90239
Wärmequelle [kWh]	579	972	1617	1289	590
Ausnutzungsgrad [-]	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99
Kühlbedarf [kWh]	4	12	37	22	4
Kühlbedarf [kWh/m²]	0	0	0	0	0

Tab. 7.19: Monatliche Heizwärmebedarf des Gebäudemodells mit Badgir

Das Modell mit Badgir hat jedem Monat $(1-\eta)\gamma$ geringer als 0.01. Deswegen der Kühlbedarf des Gebäudes gleich null ist, wobei Der Kühlbedarf des Gebäudemodells ohne Badgir gleich 24 [kWh/(m².a)] ist. Das heißt, der Badgir kann den gesamten Kühlbedarf des Gebäudemodells abdecken.

Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Ansätze zur Bilanzierung von Badgiren und Luftkollektorkonstruktionen studiert und ein Beitrag zur Bilanzierung, harmonisiert mit der DIN V 18599, neu entwickelt. Die rechnerische Bilanzierung der Einzelelemente wurde mit dem Werkzeug der thermisch dynamischen Simulation entwickelt und überprüft.

Da Badgir und Luftkollektor real in einer dynamischen Wechselbeziehung zueinander stehen. Es ist zu erwarten, dass dies durch die entwickelte Bilanzierung nicht abgebildet werden kann bzw. in Realität bessere Werte aufweist. Daher sollte dessen energetisches Verhalten als energetisches Gesamtsystem dynamisch simuliert werden. Für die Simulation wird Simulationssoftware TRNSYS (TRNSYS 17.2 2014) vorgeschlagen.

Von besonderem Interesse bei der Untersuchung der thermischen Verknüpfung von Kollektor und Badgir ist die Funktion des Kollektors während der Kühlperiode. Dieser wirkt als Solarkamin, welcher die Nutzbarkeit der adiabatisch gekühlten Luft des Badgirs erhöhen kann. Die Simulation dieser Wechselwirkung ist der Kern der dynamischen Simulation.

Darüber hinaus sollten die Schwerkraft der befeuchteten Luft im Badgir und die Windeinflüsse im Badgir genau untersucht und simuliert werden. Die Untersuchung könnte mit Hilfe von CFD-Software (Software für numerische Strömungsmechanik) durchgeführt werden. Für solche Untersuchungen wird TRNFLOW (TRNFLOW 2011) vorgeschlagen, das ein Zusatz zu TRNSYS darstellt und ein Gesamt-Simulationsmodell gewährleisten würde.

Für die abschließende Verifizierung der Ergebnisse dieser Arbeit sowie zur weiteren Untersuchung der Wechselwirkung von Badgir und Kollektor müsste ein Gebäude mit Badgir und Luftkollektor errichtet werden, das durch ein Monitoring bewertet werden kann und somit weitergehende Rückschlüsse zulässt.

Ein erster Schritt jedoch kann sein, ein Excel-Tool zu entwickeln, mit dem ein Gebäude gemäß Kapitel 7 bilanziert werden kann. Mit Hilfe dieses Tools ist jeder Kollektor und Badgir, separat und in Kombination, bilanzierbar. Hierbei kann der oben beschriebene Solarkamin-Effekt allerdings nicht abgebildet werden.

Im Bereich der Architekturforschung sollten Grundriss- und Schnittstudien abhängig von Erkenntnissen aus der Strömungslehre folgen, aus denen die sinnvolle Positionierung von Badgir und Luftkollektor hervorgehen kann. Die Analyse alter iranischer Architekturen bildete die Grundlage.

8 Literaturverzeichnis

ASHREA 55 **210**: *hermal Environmental Conditions for Human Occupancy*

Bahadori 1985 BAHADORI, Mehdi N.: *An improved design of wind towers for natural ventilation and passive cooling*. In: *Solar Energy* 35 (1985), Nr. 2, S. 119–129

Bahadori, Dehghani 2008 BAHADORI, Mehdi N. (Hrsg.); DEGHANI, Alireza (Hrsg.): *Wind Tower, A Masterpice of Iranian Engineering*. 1. Aufl. Teheran : Yazda, 2008. – ISBN 9786005058208

Bahadori, Pakzad BAHADORI, Mehdi N. ; PAKZAD, Amir R.: *Performance Evaluation of New Designs of Wind Towers*. In: *ASME 2002 Joint U.S.-European Fluids Engineering Division Conference*, S. 1015–1021

Bahādūrī'nizhād, Dehghani-sanij, Sayigh, A. A. M. BAHĀDURĪ'NIZHĀD, Mahdī ; DEGHANI-SANIJ, Alireza ; Sayigh, A. A. M.: *Wind towers : Architecture, climate and sustainability*. – ISBN 9783319058757

Bahādūrī'nizhād, Ya'qūbī, Sa'dvandī 2007BAHĀDURĪ'NIZHĀD, Mahdī ; YA'QŪBĪ, Maḥmūd ; SA'DVANDĪ, Sūsan: *Tahviyah va sarmāyish-i ṭabī'ī dar sākhtimānhā-yi sunnat-i Īrān*. Chāp-i 1. [Tīhrān] : Markaz-i Nashr-i Dānishgāhī, 2007 (Markaz-i Nashr-i Dānishgāhī Makānīk 35). – ISBN 9640112607

Dehghani-sanij, Soltani, Raahemifar 2015DEGHANI-SANIJ, A. R. ; SOLTANI, M. ; RAAHEMIFAR, K.: *A new design of wind tower for passive ventilation in buildings to reduce energy consumption in windy regions*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42 (2015), S. 182–195

DIN 1946-2 **1994**: *Raumlufttechnik Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregel n)*

DIN 4108 Beiblatt 2 **2006**: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele*

DIN 4108-2 **2011**: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*

DIN 4108-4 **2012**: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte*

DIN EN 13363-1 **2007**: *Sonnenschutzeinrichtungen in Kombination mit Verglasungen – Berechnung der Solarstrahlung und des Lichttransmissionsgrades – Teil 1: Vereinfachtes Verfahren*

DIN EN 13363-2 **2005**: *Sonnenschutzeinrichtungen in Kombination mit Verglasungen – Berechnung der Solarstrahlung und des Lichttransmissionsgrades – Teil 2: Detailliertes Berechnungsverfahren*

DIN EN 14511-2 **2015**: *Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und kühlung und ProzessKühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Teil 2: Prüfbedingungen;*

DIN EN 15251 **2012**: *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*

DIN EN 16147 **2015**: *Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Prüfungen und Anforderungen an die Kennzeichnung von Geräten zum Erwärmen von Brauchwarmwasser;*

DIN EN 410 **2011a**: *Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen*

DIN EN 410 **2011b**: *Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen*

DIN EN 832-1 **2003**: *Berchnung des Heizenergiebedarfs Wohngebäude*

DIN EN ISO 13370 **2008**: *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Wärmeübertragung über das Erdreich – Berechnungsverfahren*

DIN EN ISO 13789 **2008**: *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren*

DIN EN ISO 13790 **2008**: *Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung*

DIN EN ISO 6946 **2008**: *Bauteile – Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren*

DIN EN ISO 7345 **1996**: *Wärmeschutz- Physikalische Größen und Definitionen*

DIN EN ISO 7730 **2006**: *Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*

DIN V 18599-1 **2011**: *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*

DIN V 18599-10 **2011**: *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*

DIN V 18599-2 **2011**: *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen*

DIN V 18599-4 2011: *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung*

DIN V 18599-6 2011: *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 6: Endenergiebedarf von Lüftungsanlagen, Luftheizungsanlagen und Kühlsystemen für den Wohnungsbau*

DIN V 18599-7 2011: *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 7: Endenergiebedarf von Raumluftheiz- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau*

DIN V 18599-8 2011: *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 8: Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungssystemen*

DIN V 4108-6 2003: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs*

Energy Plus 2015 Energy Plus: <http://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>

Karakatsanis, Bahadori, Vickery 1986a KARAKATSANIS, C. ; BAHADORI, M. N. ; VICKERY, B. J.: *Evaluation of pressure coefficients and estimation of air flow rates in buildings employing wind towers*. In: *Solar Energy* 37 (1986), Nr. 5, S. 363–374

Karakatsanis, Bahadori, Vickery 1986b KARAKATSANIS, C. ; BAHADORI, M. N. ; VICKERY, B. J.: *Evaluation of pressure coefficients and estimation of air flow rates in buildings employing wind towers*. In: *Solar Energy* 37 (1986), Nr. 5, S. 363–374

Mahdavinejad, Abedi 2012 MAHDAVINEJAD, M. ; ABEDI, M.: *SUBSIDIZE-REFORM PLAN AND ENERGY EFFICIENCY IN BUILDING ENERGY CONSUMPTION IN CASE OF IRAN*. In: *Academic Research International* (2012), S. 637–645

Menerga 2009 Menerga: *Menerga Psychrometric Chart* : Geometrico GmbH & Co. KG, 2009

Meteotest 2014 Meteotest: *Meteonorm* : Meteotest, 2014. URL www.meteonorm.com

National Building Regulation of Iran 2010 National Building Regulation of Iran: *Energy Conservation, Part 19*. Tehran, Iran, 2010, 2010. – ISBN 9-82-7588-964-978

Rashad 1998 RASHAD, Mahmoud: *Iran : Geschichte, Kultur und Traditionen : antike Stätten und islamische Kunst in Persien*. Köln : DuMont, 1998. – ISBN 9783770133857

RODECA GmbH **2014** RODECA GMBH: *Handbuch_LBE_40, Lichtbauelemente 40mm, Lichtbauelemente aus Polycarbonat für sprossenlose Verglasung, System PC 2540- 10 / PC 2540- 7 / PC 2540- 6 /PC 2540- 4 / PC 2540- 4 MC, System AF 50 / System AF 100 und PC 2410-3* (in Kraft getr. am 2014) (2014)

Spath 2010 SPATH, Dieter: *Green Office : Ökonomische und ökologische Potenziale nachhaltiger Arbeits- und Bürogestaltung*. 1. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 2010. – ISBN 3834989525

Tersluisen 2012 TERSLUISEN, Angèle: *Konzept zur Planung und Bewertung wärmeenergiegewinnender, energetisch dynamischer Bauteil- und Raumstrukturen im Wohnungsbau*. 1. Aufl. Freiburg, Br. : syntagma, 2012. – ISBN 3940548359

Tersluisen, Bauer, Nasrollahi November 2015 TERSLUISEN, Angèle ; BAUER, Klara ; Nasrollahi: *Untersuchung zur rechnerischen Bilanzierung solarer Luftheizsysteme und -konstruktionen*, 2015

Tersluisen, Nasrollahi 11/2014 TERSLUISEN, A. ; NASROLLAHI, K.: *Die Bauphysik des Luftkollektors : Solare Luftheizsysteme und -konstruktionen*. In: *DBZ* 2041 (11/2014), 11/2014-Energie Spezial, S. 68–71

Werner J. Platzer **2000** Werner J. Platzer (Hrsg.); Fachverband Transparente Wärmedämmung e.V. (Mitarb.): *Bestimmung des solaren Energiegewinns durch Massivwände mit transparenter Wärmedämmung : Richtlinie des Fachverbandes Transparente Wärmedämmung e.V.*, 2000 (2000)

Yar-Shater 1991 YAR-SHATER, Ehsan: *Encyclopedia Iranica* : Mazda Publishers, 1991. – ISBN 093921475X, 9780939214754

LEBENS LAUF

Persönliche Daten

Name	Kamyar Nasrollahi
Email	kamyar.nasrollahi@architektur.uni-kl.de

Ausbildung

2008- 2010	Studium der Regenerative Energien und Energieeffizienz an der Universität Kassel, Abschluss als Master of Science
1997-2001	Studium des Maschinenbaus an der Universität Kashan (Iran), Abschluss als Bachelor of Engineering

Beruflicher Werdegang

2010 - heute	Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Hauskybernetik, Fachbereich Architektur an der TU Kaiserslautern (Jun. Prof. Dr.-Ing. Angèle Tersluisen)
2012 - heute	Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion, Fachbereich Bauingenieurwesen an der TU Kaiserslautern (Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn)
2003 – 2007	Experte für „Energie in Gebäuden“ bei General Motors (Pars Khodro), Teheran (Iran)
2001 - 2003	Controller in HVAC (Heating, Ventilation & Air Conditioning) bei Stadtschulverwaltung, Isfahan (Iran)